Albert Einstein
Leopold Infeld

# A EVOLUÇÃO DA FISICA

## De Newton até à Teoria dos quanta

Colecção Vida e Cultura · Edição Livros do Brasil · Lisboa

Este clássico da divulgação científica, divulgação que os «puristas» têm vindo, ao longo do tempo, a considerar como supérflua ou, até, impossível, foi, e continua a ser, um livro básico para a compreensão — a nível do grande público, evidentemente — da física moderna e, em particular, da teoria da relatividade. O admirável trabalho de colaboração entre Leopold Infeld e Albert Einstein, no qual a modéstia dos verdadeiros sábios não desempenha menor lugar que o seu imenso saber, veio, com efeito, abrir a muita gente perspectivas de maravilha sobre o livro cifrado que a Natureza incessantemente nos vai dando a ler!

por ALBERT EINSTEIN
e LEOPOLD INFELD

«O esforço para ler o grande romance policial da Natureza é velho como o próprio pensamento humano. Mas há apenas uns três séculos que os estudiosos começaram a compreender a língua em que o livro está escrito. E a partir desse tempo — a época de Galileu e Newton — a leitura passou a fazer-se com rapidez. Foram-se desenvolvendo técnicas de investigação, métodos sistemáticos de descobrir e seguir pistas. Alguns dos enigmas receberam solução — embora muitas soluções fossem precárias e acabassem abandonadas em consequência de posteriores pesquisas.

Um problema fundamental, e por milhares de anos completamente obscurecido pelas suas próprias complicações, é o do *movimento*. Todos os movimentos observáveis na Natureza — o da pedra lançada para o ar, o do navio que sulca as águas, o do automóvel que roda pela estrada — são na realidade muito complicados. Para compreendê-los temos que começar pelos casos mais simples e gradualmente irmos subindo. Consideremos um corpo em repouso, no qual não haja nenhum movimento. Para mudar a posição desse corpo é necessário que sobre ele exerçamos alguma influência — empurrá-lo, erguê-lo ou deixar que outros corpos, como os cavalos ou os motores, o façam. A nossa ideia intuitiva do movimento correlaciona-o a actos de puxar, empurrar, levantar. Experiências muito repetidas fazem-nos arriscar a ideia de que temos de empurrar com mais força, se queremos que o corpo se mova mais depressa. Parece natural concluir que, quanto maior for a acção exercida sobre um corpo, tanto maior será a sua velocidade. A intuição diz-nos que a velocidade está essencialmente ligada à acção.»

COLECÇÃO VIDA E CULTURA

**ALBERT EINSTEIN**
~
**LEOPOLD INFELD**

# A EVOLUÇÃO DA FÍSICA

O desenvolvimento das ideias
desde os primitivos conceitos até à Relatividade
e aos Quanta

EDIÇÃO «LIVROS DO BRASIL» LISBOA
*Rua dos Caetanos, 22*

# A EVOLUÇÃO DA FÍSICA

# ÍNDICE

## AGRADECIMENTOS

Desejamos expressar os nossos sinceros agradecimentos a quantos tão amavelmente nos auxiliaram na preparação deste livro, particularmente:

Aos Profs.: A. G. Shenstone, de Princetown, Nova Jersey, e St. Loria, de Lwow, Polónia, pelas fotografias da página 219.

Ao Sr. I. N. Steinberg, pelos seus desenhos.

À Dr.ª M. Phillips, pela revisão do manuscrito e pela sua valiosa cooperação.

*A. E.* e *L. I.*

# *PREFÁCIO*

*Quem pega neste livro tem o direito de indagar da sua razão de ser e de perguntar a que público se dirige.*

*No começo da obra não é fácil a resposta; torna-se fácil no fim — mas é já supérflua. Bem mais simples será dizer o que o livro não é. Não é, por exemplo, um compêndio de física — nada de um curso elementar de teorias e factos físicos. A nossa intenção pende mais para um largo esboço das tentativas do espírito humano no apreender as conexões entre o mundo das ideias e o dos fenómenos. Para isso procuraremos ver as forças activas que compelem a ciência a inventar ideias em correspondência com a realidade do nosso mundo. Mas a representação tem que ser simples. No amontoado de factos e conceitos temos de escolher uma estrada que nos pareça a mais característica e significativa. Factos e teorias não alcançados por esta estrada serão omitidos. O fim que visamos obriga-nos a fazer uma escolha bem definida de factos e ideias. A importância de um problema não depende do número de páginas a ele consagradas. Deixámos de lado algumas linhas essenciais de pensamento; não que as considerássemos sem importância, mas porque não se achavam à beira do caminho.*

*Durante a feitura do livro, longos debates tivemos a propósito das características do leitor idealizado, ponto que muito nos preocupou. Imaginámos um leitor de grandes qualidades, mas por completo desconhecedor da física e das matemáticas; interessado, entretanto, em ideias físicas e filosóficas — e muito admiramos a paciência desse leitor nas passagens menos interessantes e mais penosas. Imaginámos um leitor que sabe que, para entender qualquer página do livro, tem de ler cuidadosamente as precedentes. Um leitor que sabe que um livro de ciência, embora popular, não pode ser lido como se lêem os romances.*

*Trata-se de uma simples conversa entre nós, de um lado, e esse leitor imaginário, do outro. Poderá ele achar a obra interessante ou maçadora, excitante ou sonolenta — mas o nosso objectivo terá sido atingido, se lhe dermos uma ideia da luta sem fim em que o espírito humano se empenhou para a compreensão das leis que regem os fenómenos físicos.*

# SURTO DA INTERPRETAÇÃO MECANICISTA

## O GRANDE ROMANCE POLICIAL

O romance policial perfeito existe na imaginação. Esse romance mostra todos os fios da meada ou pistas essenciais, e compele-nos a formular a nossa teoria pessoal sobre o caso. Se seguirmos cuidadosamente o enredo, por nós próprios descobriremos a solução, antes que o autor no-la desvende no fim do livro. E, além de nos aparecer no momento exacto em que a esperamos, não nos desaponta — ao contrário do que se dá nos mistérios vulgares.

Ser-nos-á possível comparar o leitor de tal romance aos cientistas que através de sucessivas gerações continuam a procurar a chave dos mistérios do livro da Natureza? A comparação é falsa; terá mais tarde de ser abandonada; mas possui uma parcela de justificação que pode ser alargada e modificada com proveito para o esforço da ciência no decifrar dos mistérios do Universo.

O grande romance policial do Universo está ainda sem solução. E nem sequer podemos afirmar que comporte solução. A sua leitura já nos deu muito; ensinou-nos os rudimentos da língua da Natureza; habilitou-nos a apreender numerosos fios da meada, e tem sido uma fonte de excitação e deleite na penosa marcha da ciência. Percebemos, entretanto, que, apesar de todos os volumes lidos e compreendidos,

estamos ainda muito longe da solução completa — se é que existe. Em cada estágio procuramos encontrar explicação que harmonize os pontos já descobertos. Teorias hipotéticas têm explicado muitos factos, mas nenhuma solução geral, que reúna todos os fios, apareceu ainda. Frequentemente uma teoria na aparência perfeita mostra-se falha logo que a leitura do grande livro prossegue. Novos factos surgem que a contradizem ou não são por ela explicados. Quanto mais lemos a Natureza, mais lhe apreendemos a perfeição — embora a solução do enigma se afaste com essa maior leitura.

Em todos os romances policiais, desde os primorosos de Conan Doyle, momento chega em que o detective reúne todos os elementos de que necessita para resolver pelo menos parte do problema. Esses elementos podem parecer muito estranhos entre si, e incoerentes. O arguto detective, entretanto, sente que bastam, e que apenas pela força do pensamento poderá ligá-los todos num conjunto solucionador. E vem então a hora em que os Sherlocks pegam do violino ou se estiram na cadeira preguiçosa, de cachimbo na boca, até que... Santo Deus! Heureka, heureka! Não só encontram a explicação para os factos já coligidos, como deduzem que umas tantas coisas devem ter ocorrido. E como sabem agora para onde se dirigir, podem, se querem, coligir mais factos comprovativos das suas teorias.

Mas o cientista que lê o livro da Natureza tem que achar a solução por si mesmo; não pode, como o impaciente leitor de novelas, saltar páginas para ver o desfecho. Para obter uma solução, ainda que parcial, o cientista sendo ao mesmo tempo leitor e pesquisador tem de reunir factos e à força de pensamento lógico coordená-los, coerente e extensivamente.

O nosso objectivo, nas páginas que se seguem, é descrever em largos traços a obra dos físicos, que corresponde às conjecturas, às «deduções» do detective. Preocupar-nos-emos, sobretudo, com o papel do pensamento e das ideias na aventurosa caça de soluções dentro do mundo físico.

## A PRIMEIRA PISTA

O esforço para ler o grande romance policial da Natureza é velho como o próprio pensamento humano. Mas há apenas uns três séculos que os estudiosos começaram a compreender a língua em que o livro está escrito. E a partir desse tempo — a época de Galileu e Newton — a leitura passou a fazer-se com rapidez. Foram-se desenvolvendo técnicas de investigação, métodos sistemáticos de descobrir e seguir pistas. Alguns dos enigmas receberam solução — embora muitas soluções fossem precárias e acabassem abandonadas em consequência de posteriores pesquisas.

Um problema fundamental, e por milhares de anos completamente obscurecido pelas suas próprias complicações, é o do *movimento*. Todos os movimentos observáveis na Natureza — o da pedra lançada para o ar, o do navio que sulca as águas, o do automóvel que roda pela estrada — são na realidade muito complicados. Para compreendê-los temos que começar pelos casos mais simples e gradualmente irmos subindo. Consideremos um corpo em repouso, no qual não haja nenhum movimento. Para mudar a posição desse corpo é necessário que sobre ele exerçamos alguma influência — empurrá-lo, erguê-lo ou deixar que outros corpos, como os cavalos ou os motores, o façam. A nossa ideia intuitiva do movimento correlaciona-o a actos de puxar, empurrar, levantar. Experiências muito repetidas fazem-nos arriscar a ideia de que temos de empurrar com mais força, se queremos que o corpo se mova mais depressa. Parece natural concluir que, quanto maior for a acção exercida sobre um corpo, tanto maior será a sua velocidade. Um carro de quatro cavalos vai mais depressa que um de dois. A intuição diz-nos que a velocidade está essencialmente ligada à acção.

Os leitores de novelas sherlockianas sabem como as pistas falsas perturbam a história e atrasam a solução. O método de raciocinar ditado pela intuição era uma pista errada que levou

a ideias falsas sobre o movimento, as quais perduraram por séculos. A grande autoridade de Aristóteles foi talvez a causa principal da longa fé no intuito. Na *Mecânica*, que há dois mil anos é atribuída a esse filósofo, lemos o seguinte:

*O corpo em movimento estaciona quando a força que o impele cessa de agir.*

A descoberta e o emprego do raciocínio científico, que devemos a Galileu, foi um dos mais importantes triunfos registados na história do pensamento humano — e marcam o verdadeiro começo da ciência física. Ensina-nos essa descoberta que as conclusões intuitivas baseadas na observação imediata nem sempre merecem fé, porque muitas vezes levam a pistas erradas.

Mas como erra a intuição? Poderá ser erro dizer que um carro de quatro animais deve rodar mais depressa que um de apenas dois?

Examinemos mais de perto os factos fundamentais do movimento, tomando como ponto de partida simples experiências de todos os dias, familiares ao homem desde os começos da Civilização e adquiridas na árdua luta pela existência.

Suponhamos que alguém vai por uma estrada plana a empurrar um carrinho e subitamente pare de empurrá-lo. Antes de imobilizar-se, o carrinho ainda se moverá até curta distância. Surge a pergunta: como será possível aumentar essa distância? Há vários meios: azeitar o eixo, tornar a estrada mais lisa. Quanto mais lisa for a estrada e mais maciamente girarem as rodas, maior será a distância percorrida. E que aconteceu em consequência do azeitamento do eixo e do alisamento da estrada? Apenas isto: diminuição das influências externas. O efeito do que chamamos atrito diminuiu, tanto no contacto do eixo com as rodas, como no das rodas com o chão. Isto já é uma interpretação teórica da evidência observável — uma interpretação, na realidade, arbitrária. Se dermos mais um passo à frente, entraremos na pista certa. Imaginemos uma estrada perfeitamente lisa e um sis-

tema de eixo e rodas em que não haja nenhum atrito. Neste caso, nada interferiria no carrinho, o qual rodaria perpetuamente. Formulamos esta conclusão unicamente por força do pensamento, idealizando uma experiência que não pode ter realidade, visto ser impossível eliminar todas as influências externas. Mas esta experiência idealizada dá-nos a base mecânica do movimento.

A comparação dos dois métodos de abordar o problema permite-nos dizer: a ideia intuitiva é que quanto maior for a acção, tanto maior será a velocidade. Assim, a velocidade indica se há ou não forças externas actuando sôbre o corpo. Galileu mostrou mais correctamente que, se um corpo não é puxado ou impelido, nem influenciado de qualquer maneira (ou, mais sinteticamente, se nenhuma força externa actua sobre ele), esse corpo se move uniformemente, isto é, sempre com a mesma velocidade e em linha recta. Sendo assim, a velocidade não indica que forças externas estejam ou não agindo sobre o corpo. A conclusão de Galileu foi mais tarde formulada por Isaac Newton nos termos da *lei da inércia*. Tornou-se uma das primeiras coisas que de física costumamos decorar na escola:

*Todos os corpos se conservam em estado de repouso, ou em movimento uniforme em linha recta, salvo se forem compelidos a sair desse estado por acção de forças exercidas sobre ele.*

Já vimos que esta lei da inércia não pode ser directamente deduzida de qualquer experiência; decorre do pensamento especulativo baseado na observação. A experiência ideal que o caso exigia, conquanto não possa ser realizada, leva-nos a uma profunda compreensão das experiências realizáveis.

Da variedade de movimentos complexos que nos cerca vamos tomar, para nosso primeiro exemplo, o «movimento

uniforme». É o mais simples, porque está livre de forças externas actuantes. Mas o movimento uniforme não pode ser realizado; a pedra que cai de uma torre ou o carrinho empurrado na estrada não podem, nunca, mover-se de modo absolutamente uniforme, porque é impossível eliminarmos a influência das forças externas.

Nos romances policiais, as pistas mais óbvias frequentemente levam-nos a suspeitas injustas. Nas nossas tentativas para apreender as leis da Natureza, igualmente verificamos que as explicações mais intuitivamente óbvias nos levam também, muitas vezes, a erros.

O pensamento do homem cria do Universo um quadro em perpétua mudança. A contribuição de Galileu destruiu a interpretação intuitiva para entronizar uma interpretação nova. É essa a grande significação da sua descoberta.

Uma pergunta relativa ao movimento surge imediatamente. Se a velocidade não é resultante das forças externas actuantes sobre um corpo, que é então? A resposta a esta questão fundamental foi dada por Galileu e, de modo ainda mais conciso, por Newton — advindo daí mais uma pista para a nossa investigação.

Para conseguirmos a resposta correcta, temos de pensar um pouco mais a fundo no caso do carrinho a rodar na estrada perfeitamente lisa. Na nossa experiência ideal a uniformidade do movimento é devida à ausência de forças externas. Imaginemos agora que a esse carrinho em movimento uniforme damos um impulso no sentido deste movimento. Que acontece? Claro que a velocidade aumenta. Se déssemos um impulso no sentido contrário, a velocidade decresceria. No primeiro caso, o carrinho acelera o movimento graças ao impulso, e no segundo retarda-o. Conclusão: a acção de uma força externa muda a velocidade. Assim, a velocidade propriamente dita não é consequência do impulso dado ao carrinho, mas as variações da velocidade ou as acelerações do movimento é que o são. A força interferente aumenta ou

diminui a velocidade conforme actua no sentido do movimento ou no sentido contrário. Galileu percebeu-o e com clareza o disse em *Duas Ciências Novas:*

*... qualquer velocidade comunicada a um corpo em movimento será mantida enquanto as causas externas de aceleração ou retardamento estiverem ausentes, condição que só é encontrada em planos horizontais; se os planos forem inclinados para baixo, estará sempre presente uma causa de aceleração; e se inclinados para cima, um retardamento; disto se conclui que o movimento ao longo de um plano horizontal é perpétuo; pois se a velocidade for uniforme não poderá ser diminuída, e muito menos ser destruída.*

Seguindo a boa pista chegamos a uma compreensão mais profunda do problema do movimento. A conexão entre a força e variação de velocidade (e não entre a força e velocidade, como pareceria intuitivo) constitui o alicerce da mecânica clássica formulada por Newton.

Estamos a fazer uso de dois conceitos muito importantes na mecânica de Newton: o de força e o de variação de velocidade. No ulterior desenvolvimento da ciência serão ambos alargados e generalizados. Por esse motivo temos de examiná-los mais de perto.

Que é força? Intuitivamente sentimos que é o que a própria palavra significa. O conceito intuitivo de força advém do esforço de empurrar, puxar ou lançar; advém da sensação muscular que acompanha esses actos. Mas, se generalizarmos, iremos muito além desses simples exemplos. Podemos pensar em força sem figurarmos um animal que puxa um carro. Falamos da força de atracção entre o Sol e a Terra, entre a Terra e a Lua, como também falamos das forças que causam as marés. Falamos da força por meio da qual a Terra compele tudo quanto sobre ela existe a permanecer sob a sua

esfera de influência; falamos da força dos ventos a ondear a água dos oceanos ou a agitar a folhagem das árvores. Sempre que observamos uma variação de velocidade, temos de admitir uma força externa responsável. Diz Newton nos seus *Princípios:*

*Uma força actuante é uma acção exercida sobre um corpo, de modo a mudar-lhe o estado, seja de repouso, seja de movimento uniforme e em linha recta.*

*Esta força consiste apenas na acção; e não permanece no corpo depois que a acção passa. Porque o corpo mantém cada novo estado adquirido em razão da «vis inertiae» — da força da inércia. As forças actuantes são de diferentes origens, como as que vêm da percussão, da pressão, da atracção centrípeta.*

Se uma pedra é largada do alto de uma torre, o seu movimento de nenhum modo é uniforme: a velocidade aumenta à medida que a pedra cai. Podemos concluir que uma força externa está actuando na direcção do movimento. Por outras palavras: a terra atrai a pedra. Vejamos outro exemplo. Que acontece com a pedra lançada para cima? A velocidade vai decrescendo até que a pedra chega a um ponto mais alto e começa a cair. Este decréscimo da velocidade é causado pela mesma força que acelera a queda de um corpo. Num caso a força actua no sentido do movimento e no outro actua em sentido contrário. A força é a mesma, mas determina aceleração ou diminuição da velocidade, conforme o sentido do movimento da pedra for para cima ou para baixo.

## VECTORES

Todos os movimentos que vimos considerando são *rectilíneos*, isto é, em linha recta. Temos agora de dar um passo adiante. Com analisar os casos mais simples ganhámos com-

preensão das leis da Natureza; nestas primeiras tentativas, tínhamos de fugir dos casos maiss intrincados.

A linha recta é mais simples que a curva, mas não podemos satisfazer-nos apenas com a compreensão do movimento rectilíneo. Os movimentos da Lua, da Terra e dos planetas, justamente os corpos aos quais os princípios da mecânica foram aplicados com maior brilhantismo, são movimentos curvos — e a passagem do movimento rectilíneo para o movimento curvilíneo traz-nos novas dificuldades. Precisamos ter a coragem de enfrentá-las, caso queiramos compreender os princípios da velha mecânica que nos deram as primeiras pistas e assim formaram o ponto de partida do desenvolvimento da ciência.

Consideremos outra experiência ideal, em que uma esfera perfeita rola uniformemente sobre uma mesa perfeitamente lisa. Já sabemos que se dermos impulso à esfera, isto é, se uma força externa actuar sobre ela, a sua velocidade muda. Suponhamos agora que a direcção do impulso não é, como no exemplo do carrinho, na direcção do movimento, mas sim perpendicular à linha do movimento. Que sucede à esfera? Três estádios do movimento podem ser distinguidos: o movimento inicial, a acção da força e o movimento final depois que a força cessa de agir. De acordo com a lei da inércia. as velocidades de antes e de depois da acção da força são ambas perfeitamente uniformes. Mas há uma diferença entre o movimento uniforme de antes e o de depois da acção da força: a direcção mudou. O rumo inicial da esfera e a direcção da força são perpendiculares entre si. O movimento final não será na direcção de nenhuma dessas linhas, mas entre elas, mais perto da direcção da força, se o impulso for forte e a velocidade inicial pequena, e mais perto da linha original do movimento, se o impulso for fraco e a velocidade inicial grande. A nossa conclusão, baseada na lei da inércia, é que, em geral, a acção de uma força externa muda não

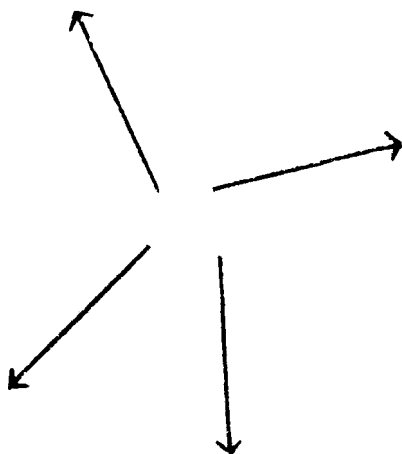
só a velocidade como ainda pode mudar a direcção do movimento. A compreensão deste facto prepara-nos para a generalização introduzida na física pelo conceito de *vector.*

Prossigamos no nosso rudimentar modo de raciocinar. O ponto de partida continua sendo a lei da inércia de Galileu. Ainda estamos longe de esgotar as consequências desta preciosa pista do enigma do movimento.

Consideremos duas esferas que sobre a mesa lisa se movem em direcções diferentes. Para termos uma representação mental definida, vamos admitir que as duas direcções são perpendiculares entre si. Desde que não há forças externas actuantes, temos movimentos perfeitamente uniformes. Suponhamos ainda que as velocidades são iguais, ou que as esferas percorrem a mesma distância no mesmo espaço de tempo. Poderemos dizer que as duas esferas têm a mesma velocidade? A resposta será sim ou não! Se os marcadores de velocidade de dois carros mostram igualmente quarenta quilómetros por hora, o usual é dizer-se que os carros têm a mesma velocidade. Mas a ciência precisa de criar língua e conceitos próprios para uso próprio. Os conceitos científicos em regra começam com os usados na linguagem comum e ganham em precisão, de modo a serem aplicáveis ao pensamento científico.

Do ponto de vista físico é vantajoso dizer que as velocidades das duas esferas a moverem-se em direcções diferentes são também diferentes. Por mera convenção, o mais conveniente é dizer que quatro carros que se afastam de um mesmo ponto por diferentes estradas não têm a mesma velocidade, embora os respectivos velocímetros registem a de quarenta quilómetros por hora. Esta diferenciação entre a velocidade e a rapidez ilustra o modo pelo qual a física, partindo de conceitos em uso na vida comum, os transforma de um modo útil ao desenvolvimento científico.

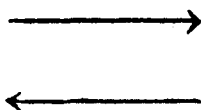
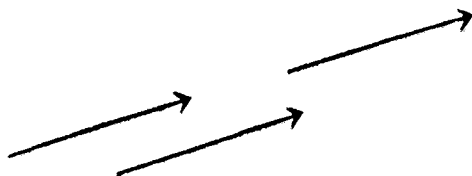
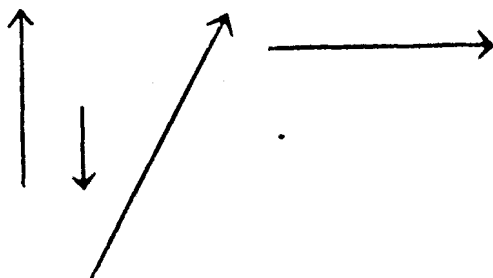
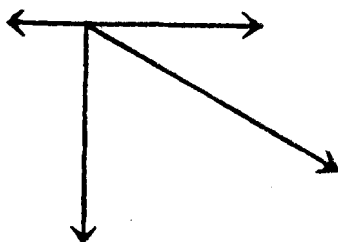
Se uma distância é medida, o resultado exprime-se por um certo número de unidades. O comprimento de uma vara pode ser de três metros e sete centímetros; o peso de um objecto

pode ser de dois quilos e três gramas; um intervalo de tempo pode ser de tantos minutos ou segundos. Em cada caso a medida exprime-se por um número. Mas um número apenas nem sempre é bastante para exprimir os conceitos físicos. O reconhecimento deste facto assinalou um sério avanço na investigação científica. Assim, uma direcção, tanto quanto um número, é essencial para a caracterização da velocidade.

Toda a quantidade possuindo simultaneamente grandeza e direcção é representada pelo que se chama *vector*. Podemos adequadamente simbolizá-lo por uma flecha.

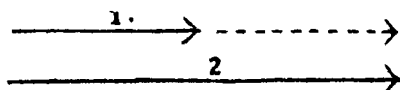
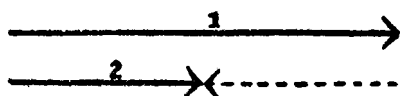
A velocidade será representada por uma flecha, ou, segundo a nossa convenção, por um vector cujo comprimento, em qualquer escala de unidades que escolhamos, é a medida da velocidade e cuja direcção é a direcção do movimento.

Se quatro carros partem com a mesma velocidade do mesmo ponto afastando-se em direcções divergentes, as suas respectivas velocidades podem ser representadas por quatro vectores do mesmo comprimento, como se vê no gráfico. Na escala usada, cada centímetro representa quarenta quiló-

metros por hora. Deste modo qualquer velocidade pode ser expressa por um vector; e, inversamente, se a escala é conhecida, podemos conhecer a velocidade por meio de um vector.

Se dois carros se cruzam numa estrada e os seus velocímetros marcam quarenta quilómetros por hora, caracterizamos essas velocidades por meio de dois diferentes vectores cujas flechas apontam para direcções opostas. Nos metropolitanos de Nova Iorque vemos flechas em direcções opostas indicando

«uptown» e «downtown». Mas todos os comboios que, com a mesma rapidez, se movem «uptown» têm a mesma velocidade, a qual pode ser representada por um vector único. Nada há no vector que indique as estações pelas quais o comboio passa, ou em qual das linhas paralelas ele corre. Por outras palavras: todos os vectores, como os figurados logo abaixo, podem ser convencionalmente olhados como iguais; estiram-se ao longo da mesma linha ou de linhas paralelas, são de igual comprimento e as suas flechas apontam na mesma direcção.

O gráfico seguinte mostra vectores diferentes, porque variam de comprimento ou direcção, ou de comprimento e direcção.

Esses quatro vectores podem ser traçados todos a divergirem de um mesmo ponto:

Desde que o ponto de partida não importa, tais vectores podem representar as velocidades de quatro carros que se afastam de um mesmo ponto, ou as velocidades de quatro carros que correm em diferentes partes do país, viajando nas direcções indicadas, com a rapidez indicada.

Esta representação por meio de vectores pode ser usada para descrever os factos já discutidos anteriormente e relacionados com o movimento linear. Falámos do carrinho a mover-se uniformemente em linha recta e a receber um impulso na direcção do movimento, impulso que lhe aumenta

a velocidade. Graficamente isto pode ser figurado por dois vectores, um mais curto, representando a velocidade antes do impulso e um mais longo, na mesma direcção, representando a velocidade depois do impulso. A significação do vector em linha pontuada é clara; representa a mudança de velocidade

causada pelo impulso. E no caso em que a força do impulso se dirige em sentido contrário do movimento do carrinho. fazendo-o diminuir de velocidade, o diagrama varia assim:

Novamente a linha pontuada corresponde a uma mudança de velocidade; mas neste caso em direcção diferente. Torna-se claro que não só as próprias velocidades, como também as suas variações, são vectores. Mas cada variação de velocidade é devida à acção de uma força externa; assim, essa força também pode ser representada por um vector. Para caracterizar uma força não basta conhecer o esforço com que empurramos o carrinho; temos ainda de dizer em que direcção o empurramos. A força, do mesmo modo que a velocidade ou a sua variação, deve ser representada por um vector e não por um número apenas. Por isso: a força exterior é também um vector e há-de ter a mesma direcção da mudança de velocidade. Nas duas últimas figuras os vectores de linhas pontuadas mostram com igual correcção a direcção da força e a da mudança de velocidade.

Neste ponto, o céptico observará que não vê vantagem na introdução dos vectores, já que tudo não passa do translado de factores previamente admitidos para uma linguagem pouco familiar e complicada. De momento é difícil convencer o céptico de que está errado. Quem tem razão *de momento* é realmente ele. A seguir, entretanto, veremos que esta linguagem estranha nos leva a importante generalização na qual os vectores aparecem como essenciais.

## O ENIGMA DO MOVIMENTO

Enquanto lidamos apenas com o movimento em linha recta torna-se-nos impossível compreender os movimentos observados na Natureza. Temos que atentar nos movimentos em curva e determinar as leis que os governam. Não é fácil a tarefa. No caso do movimento rectilíneo, os nossos conceitos de velocidade, variação de velocidade e força, mostram-se muito úteis. Mas não vemos como aplicá-los aos movimentos em curva e somos levados a imaginar que os velhos conceitos são inadequados à descrição do movimento em geral, e que novos conceitos têm que ser criados. Que fazer? Seguir o velho trilho ou procurar caminho novo?

A generalização de um conceito é processo frequentemente usado pela ciência. E não existe apenas um método de generalizar, mas sim vários. Um requisito, porém, é rigorosamente exigido de todos: qualquer conceito generalizado deve poder reduzir-se ao conceito original quando as condições originais se realizam.

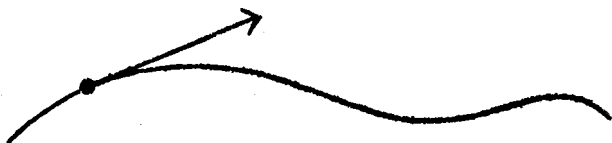
Explicaremos melhor, recorrendo ao exemplo já empregado. Podemos generalizar os velhos conceitos de velocidade, variação de velocidade e força, estendendo-os ao movimento em linha curva. Tecnicamente, quando falamos em curva, incluímos a linha recta. A linha recta não passa de um especial e trivial exemplo de linha curva. Portanto, se velocidade,

variação de velocidade e força são introduzidas no movimento em curva, claro que também são introduzidas no movimento em linha recta. Mas este resultado não deve contradizer os resultados previamente obtidos. Se a curva se torna linha recta, todos os conceitos generalizados devem ser redutíveis aos conceitos familiares sobre movimento rectilíneo. Esta restrição, porém, não basta para autorizar a generalização. Deixa muitas possibilidades em aberto. A história da ciência mostra que as mais simples generalizações são às vezes correctas e outras vezes não. Temos primeiramente de conjecturar. No caso presente é coisa simples conjecturar sobre o método certo de generalização. Os novos conceitos provam o seu próprio valor ajudando-nos a compreender o movimento tanto da pedra lançada ao ar como dos planetas.

Vejamos, pois, que significam a velocidade, a variação de velocidade e a força no caso do movimento em linha curva. Comecemos pela velocidade. Ao longo da curva desta figura temos um pequeno corpo a mover-se da esquerda para a direita. Tal corpo é com frequência chamado *partícula*.

O ponto negro na figura mostra a posição da partícula num dado momento. Qual a velocidade correspondente a essa posição e a esse tempo? De novo Galileu nos ajuda a achar o meio de estudar a velocidade. Precisamos, uma vez mais, tirar partido da imaginação e prefigurar uma experiência idealizada. A partícula move-se ao longo da curva, da esquerda para a direita, influenciada por forças externas. Suponhamos que, em dado momento, e no lugar indicado pelo ponto negro,

todas as forças subitamente cessam de agir. Nesse momento, de acordo com a lei da inércia, o movimento deve ser uniforme. Isto na experiência idealizada, porque na prática não há corpos libertos de influências externas. Podemos apenas conjecturar o «que sucederia se...?» e julgar do adequado da nossa conjectura por meio das conclusões dela tiradas e da confirmação dessas conclusões pela experiência. O vector abaixo indica a direcção conjectural desse movimento uniforme, no caso da supressão de todas as forças externas. É a direcção da tangente. Examinando ao microscópio a par-

tícula em movimento, vemos uma parte da curva, a qual aparece como pequeno segmento. A tangente é o prolongamento desse segmento. Deste modo, o vector da figura representa a velocidade num dado momento. O vector da velocidade está na tangente. O comprimento desse vector representa a grandeza da velocidade, ou a rapidez, como a indica, por exemplo, o velocímetro do carro.

A nossa experiência idealizada, da supressão das influências externas do movimento para o encontro do vector da velocidade, não deve ser tomada muito a rigor. Apenas nos ajuda a compreender o que poderíamos chamar vector da velocidade e nos habilita a determiná-lo num dado ponto e num dado momento.

Esta outra figura mostra os vectores de velocidade de três diferentes posições de uma partícula a mover-se em linha

curva. Neste caso, não só a direcção como a grandeza da velocidade, indicada pelo comprimento do vector, variam durante o movimento.

Satisfará este novo conceito de velocidade a todos os requisitos necessários às generalizações? Isto é: poderá reduzir-se ao conceito anterior, se a curva se tornar linha recta? Claro que poderá. A tangente a uma linha recta é essa própria linha. O vector da velocidade tem a direcção da linha do movimento, exactamente como no caso do carrinho e das esferas.

O passo imediato consiste no estudo da variação de velocidade de uma partícula a mover-se ao longo de uma linha curva. Isto também pode ser feito de várias maneiras, das quais vamos escolher a mais simples e conveniente. A figura anterior mostrou diversos vectores de velocidade representando o movimento em vários pontos do percurso. Os vectores n.$^{os}$ 1 e 2 podem ser novamente desenhados com um ponto de partida comum, coisa que sabemos possível para todos os vectores.

O vector de linha pontuada é chamado o vector da variação da velocidade. O seu ponto de partida está no fim do primeiro vector e o seu término aponta para o fim do segundo vector. Esta definição da variação da velocidade pode, à primeira vista, parecer artificial e sem significação. Torna-se muito mais clara no caso especial em que os vectores (1) e (2) têm a mesma direcção. Isto naturalmente significa volver ao caso do movimento em linha recta. Se ambos os vectores partem do mesmo ponto, o vector de linha pontuada liga de novo os seus extremos. E a figura torna-se idêntica à da página 24, ficando o conceito primitivo reduzido a um caso especial do novo conceito.

Cumpre observar que na figura separámos as duas linhas, para que não coincidam e desse modo possam ser distinguidas.

Vamos agora dar o último passo no nosso processo de generalização — formulando a mais importante das suposições que até aqui fizemos. A conexão entre a força e variação de velocidade tem que ser estabelecida de modo que possamos entrar no caminho da compreensão do problema geral do movimento.

A pista para a explanação do movimento em linha recta era simples: a força externa responde pela variação de velocidade; o vector da força tem a mesma direcção do vector da variação de velocidade. Agora, porém, qual a explicação do movimento em curva? Exactamente o mesmo! A única diferença está em que agora a variação de velocidade tem uma significação mais larga do que antes. Uma vista de olhos aos vectores de linhas pontuadas das duas últimas figuras esclarecerá. Se a velocidade em todos os pontos da curva é

conhecida, a direcção da força em qualquer dos pontos pode ser deduzida imediatamente. Podemos traçar os vectores da velocidade para dois instantes separados por um curto intervalo de tempo e portanto correspondentes a posições muito próximas entre si. O vector que vai do ponto terminal do primeiro ao ponto terminal do segundo indica a direcção da força actuante. Mas é essencial que os dois vectores da velocidade sejam separados por um intervalo de tempo «muito curto». A análise rigorosa de tais expressões, «muito próximo» e «muito curto», não é simples, e foi o que levou Newton e Leibnitz à descoberta do cálculo diferencial.

Muito penoso é o caminho que leva à generalização de Galileu, e não podemos mostrar aqui como foi abundante e fecundo em consequências. A sua aplicação conduz-nos a simples e convincentes explanações de muitos factos até então sem nexo e incompreensíveis.

Da grande variedade de movimentos vamos tomar o mais simples para a demonstração da lei acima formulada.

Uma bala que parte da carabina, uma pedra lançada a distância, um jacto de água: todos estes corpos em movimento descrevem uma curva que nos é familiar, a parábola. Imagi-

nemos um velocímetro ligado, por exemplo, à pedra, de modo que o vector da velocidade possa ser traçado a qualquer momento.

O resultado pode muito bem ser representado nesta figura. A direcção da força actuante na pedra é a mesma que a da

O vector de linha pontuada é chamado o vector da variação da velocidade. O seu ponto de partida está no fim do primeiro vector e o seu término aponta para o fim do segundo vector. Esta definição da variação da velocidade pode, à primeira vista, parecer artificial e sem significação. Torna-se muito mais clara no caso especial em que os vectores (1) e (2) têm a mesma direcção. Isto naturalmente significa volver ao caso do movimento em linha recta. Se ambos os vectores partem do mesmo ponto, o vector de linha pontuada liga de novo os seus extremos. E a figura torna-se idêntica à da página 24, ficando o conceito primitivo reduzido a um caso especial do novo conceito.

Cumpre observar que na figura separámos as duas linhas, para que não coincidam e desse modo possam ser distinguidas.

Vamos agora dar o último passo no nosso processo de generalização — formulando a mais importante das suposições que até aqui fizemos. A conexão entre a força e variação de velocidade tem que ser estabelecida de modo que possamos entrar no caminho da compreensão do problema geral do movimento.

A pista para a explanação do movimento em linha recta era simples: a força externa responde pela variação de velocidade; o vector da força tem a mesma direcção do vector da variação de velocidade. Agora, porém, qual a explicação do movimento em curva? Exactamente o mesmo! A única diferença está em que agora a variação de velocidade tem uma significação mais larga do que antes. Uma vista de olhos aos vectores de linhas pontuadas das duas últimas figuras esclarecerá. Se a velocidade em todos os pontos da curva é

conhecida, a direcção da força em qualquer dos pontos pode ser deduzida imediatamente. Podemos traçar os vectores da velocidade para dois instantes separados por um curto intervalo de tempo e portanto correspondentes a posições muito próximas entre si. O vector que vai do ponto terminal do primeiro ao ponto terminal do segundo indica a direcção da força actuante. Mas é essencial que os dois vectores da velocidade sejam separados por um intervalo de tempo «muito curto». A análise rigorosa de tais expressões, «muito próximo» e «muito curto», não é simples, e foi o que levou Newton e Leibnitz à descoberta do cálculo diferencial.

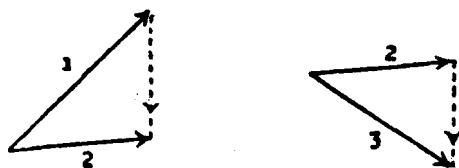
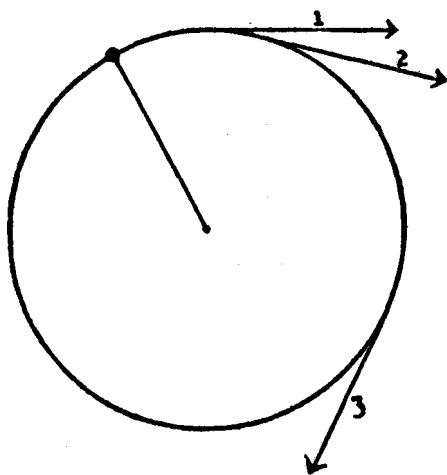
Muito penoso é o caminho que leva à generalização de Galileu, e não podemos mostrar aqui como foi abundante e fecundo em consequências. A sua aplicação conduz-nos a simples e convincentes explanações de muitos factos até então sem nexo e incompreensíveis.

Da grande variedade de movimentos vamos tomar o mais simples para a demonstração da lei acima formulada.

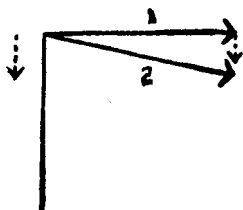
Uma bala que parte da carabina, uma pedra lançada a distância, um jacto de água: todos estes corpos em movimento descrevem uma curva que nos é familiar, a parábola. Imaginemos um velocímetro ligado, por exemplo, à pedra, de modo que o vector da velocidade possa ser traçado a qualquer momento.

O resultado pode muito bem ser representado nesta figura. A direcção da força actuante na pedra é a mesma que a da

variação de velocidade, e já vimos como pode ser determinada. A figura seguinte mostra que a força é vertical e dirigida para baixo. Exactamente o mesmo que se dá quando a pedra cai de uma torre. As trajectórias são diferentes, como tam-

bém são diferentes as velocidades, mas a variação da velocidade, isto é, a aceleração do movimento tem a mesma direcção — o centro da Terra.

Uma pedra ligada a um cordel e girada em plano horizontal descreve uma trajectória circular.

Todos os vectores do diagrama anterior, representando este movimento, possuem o mesmo comprimento, quando a velocidade for uniforme.

Não obstante, a velocidade não é uniforme, porque o caminho não é em linha recta. Unicamente no movimento uniforme rectilíneo não há forças interferentes. Aqui, no entanto, há tais forças, e a velocidade muda, não em grandeza, mas em direcção. De acordo com a lei do movimento deve existir alguma força responsável por esta mudança, uma força que aparece entre a pedra e a mão que segura o cordel. Surge então a pergunta: em que direcção age essa força? De novo o diagrama vectorial nos dá a resposta. Traçados os vectores da velocidade de dois pontos muito próximos, o da variação da velocidade, ou aceleração do movimento estará encontrado.

Este último vector dirige-se ao longo do cordel para o centro do círculo e é sempre perpendicular ao vector da velocidade, que tem a direcção da tangente. Por outras palavras: por meio do cordel a mão exerce sobre a pedra uma força.

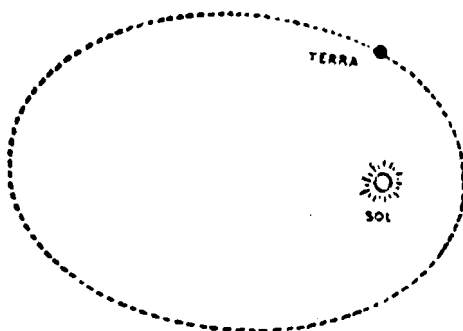
Muito semelhante a isto é o caso da revolução da Lua em redor da Terra, que pode ser representada como um movimento uniforme circular. A força dirige-se para a Terra pela mesma razão que no último exemplo se dirigia para a mão. Não há cordel ligando a Terra à Lua, mas podemos imaginar uma linha entre os centros dos dois corpos; a força conserva-se ao longo desta linha, tendo a sua direcção para o centro da Terra, justamente como a força no caso de uma pedra lançada para cima ou a cair de uma torre.

Tudo quanto dissemos a respeito do movimento pode resumir-se numa só sentença. *Força actuante e variação de*

*velocidade ou aceleração são vectores com a mesma direcção.* Está aqui o caminho inicial para a solução do problema do movimento, mas não basta para a completa explicação de todos os movimentos observados. A transição do pensamento de Aristóteles para o de Galileu constitui a mais importante pedra angular da ciência. Realizada esta passagem, o rumo de futuros desenvolvimentos tornou-se claro. O nosso interesse reside nos primeiros estágios do desenvolvimento: no seguir as sendas iniciais e mostrar como os conceitos físicos nascem dessa penosa luta com as velhas ideias. A preocupação deste livro só vai para os trabalhos pioneiros da ciência, os que lhe revelaram novos e inesperados caminhos de desenvolvimento; são as aventuras do pensamento científico que criam uma concepção sempre em mudança do Universo. Os passos fundamentais e iniciais são sempre de carácter revolucionário. Quando a imaginação científica acha os velhos conceitos muito confinados, substitui-os por conceitos novos. Mas antes que isso se torne necessário para a conquista de um novo campo, o desenvolvimento das ideias num rumo já tomado está mais na natureza da evolução. Para que compreendamos que razões e dificuldades nos forçam a modificar importantes conceitos, devemos conhecer não só os caminhos iniciais como também as conclusões a que eles nos levam.

Uma das mais importantes características da física moderna é que as conclusões tiradas dos caminhos iniciais são igualmente qualitativas e quantitativas. Atentemos de novo na pedra a cair da torre. Vimos que a sua velocidade cresce, mas gostaríamos de saber algo mais. Que proporção tem este aumento? Qual a posição e a velocidade da pedra em qualquer momento da queda? Queremos habilitar-nos a predizer o que vai dar-se e a determinar pela experiência se a observação confirma essas predições e, portanto, as suposições iniciais.

Para estabelecer conclusões quantitativas precisamos usar a linguagem das matemáticas. A maior parte das ideias científicas fundamentais são na essência simples e em geral podem

ser expressas em termos compreensíveis a todos. Mas para prosseguir no desdobramento dessas ideias há que ter conhecimentos de requintada técnica de investigação. Se queremos obter conclusões que possam ser confirmadas pela experiência, temos de usar as matemáticas como instrumento de raciocínio. Mas como só estamos interessados nas ideias físicas fundamentais, podemos fugir à linguagem matemática. É deliberadamente que nestas páginas fazemos isso e, portanto, seremos forçados ocasionalmente à apresentação sem provas de alguns resultados necessários à compreensão de importantes princípios que influem no desenvolvimento ulterior. O preço a ser pago pelo abandono da linguagem matemática é a perda de precisão e a necessidade de às vezes apresentar resultados sem mostrar como foram obtidos.

Importante exemplo de movimento, temo-lo no da Terra em redor do Sol. Sabe-se que a órbita descrita é uma curva fechada, chamada elipse. A construção do vector da variação da velocidade mostra que a força de gravitação exercida sobre a Terra se dirige para o Sol. Mas isto é pouco.

Gostaríamos de predizer a posição da Terra e dos demais planetas num dado momento; gostaríamos de predizer a data

e a duração do próximo eclipse do Sol e de muitos outros acontecimentos astronómicos. São coisas possíveis de fazer, mas não com base nos nossos caminhos iniciais, porque se torna necessário conhecer não só a direcção da força como também o seu valor absoluto, a sua grandeza. A Newton devemos a inspirada conjectura que resolveu o problema. De acordo com a sua *lei da gravitação*, a força de atracção entre dois corpos depende da distância a que estes se acham entre si. Torna-se menor quando a distância aumenta. Mais precisamente, torna-se $2 \times 2 = 4$ vezes menor se a distância dobra; $3 \times 3 = 9$ vezes menor se a distância triplica.

Vemos, pois, que no caso da força de gravitação conseguimos exprimir de um modo simples a dependência entre a força e a distância de dois corpos celestes em movimento. E procedemos da mesma maneira em todos os casos em que forças de diferentes tipos (eléctrico, magnético, etc.) entram em acção. Experimentámos usar a força uma expressão simples, expressão que só se justifica porque as conclusões que dela tiramos são confirmadas pela experiência.

Mas este conhecimento da força de gravitação não basta para a descrição dos movimentos planetários. Já vimos que têm a mesma direcção os vectores representando esta força e a aceleração do movimento para um curto intervalo de tempo, mas temos que seguir Newton e admitir uma relação simples entre os comprimentos dos vectores. Dado que sejam as mesmas todas as outras condições, e o corpo em movimento seja considerado em iguais intervalos de tempo, então, de acordo com Newton, a variação de velocidade é proporcional à força.

Assim, duas conjecturas complementares são necessárias para conclusões quantitativas em relação ao movimento dos planetas. Uma, de carácter geral: a que estabelece a conexão entre a força e a mudança de velocidade. Outra especial: a que estabelece a exacta dependência entre a força particular envolvida e a distância entre os corpos. A primeira é a lei geral do movimento, de Newton; a segunda, a sua lei da gravitação.

Conjuntas, essas leis determinam o movimento. Um raciocínio elementar poderá tornar isto mais claro. Suponhamos que, num dado momento, a posição e a velocidade de um planeta podem ser determinadas, e que a força é conhecida. Nesse caso, de acordo com as leis de Newton nós sabemos a aceleração do movimento, durante um curto intervalo de tempo.

E sabedores da velocidade inicial e da sua variação, podemos achar a velocidade e a posição do planeta no fim de pequeno intervalo de tempo. Com a contínua repetição deste processo, podemos traçar toda a órbita do movimento sem recorrermos a nenhum dado de observação. Quer dizer que, em princípio, a interpretação mecânica torna possível a predição do curso de um corpo em movimento; mas este método oferece grande dificuldade na prática, onde esse passo a passo seria extremamente tedioso e sem precisão. Felizmente, não há necessidade de recorrer a ele; as matemáticas fornecem um atalho que possibilita a exacta descrição do movimento com menor gasto de tinta do que o preciso para escrever uma frase. As conclusões deste modo alcançadas podem ser provadas ou verificadas pela observação.

Na pedra que cai e na revolução da Lua na sua órbita reconhecemos o mesmo tipo de força externa: a atracção da Terra. Newton admitiu que o movimento da pedra que caía, o movimento da Lua e dos planetas não passam de manifestação de uma força de gravitação a agir entre dois corpos.

Nos casos simples o movimento pode ser descrito e predito por meio das matemáticas. Em casos extremamente complexos, que implicam a acção de muitos corpos uns sobre os outros, a descrição matemática não é simples — mas os princípios fundamentais conservam-se os mesmos.

As conclusões a que chegámos com as nossas pistas iniciais, vemo-las realizadas no movimento de uma pedra no ar, no movimento da Lua, da Terra e dos planetas.

Mas o nosso sistema inteiro de conjecturas tem que ser

aprovado ou contestado pela experiência. Nenhuma das hipóteses pode ser isolada para um teste separado. No caso dos planetas em movimento em redor do Sol, esse sistema de interpretação mecânica funciona magnificamente. Não obstante, podemos muito bem imaginar que outro sistema, baseado em outras conjecturas, venha a justificar-se igualmente bem.

Os conceitos da física são criações do espírito humano, e não, como possam parecer, coisas determinadas pelo mundo externo. No nosso esforço para compreender a realidade a nossa posição lembra a de um homem que procura adivinhar o mecanismo de um relógio fechado. Esse homem vê o mostrador e os ponteiros, ouve o tiquetaque, mas não tem meios de abrir a caixa que esconde o maquinismo. Se é um homem engenhoso, pode fazer ideia de um maquinismo responsável por tudo o que observa exteriormente, mas não poderá nunca ter a certeza de que o maquinismo que imagina seja o único que possa explicar os movimentos exteriores.

Não poderá nunca comparar a ideia que forma do mecanismo interno com a realidade desse mecanismo — nem sequer pode imaginar a possibilidade ou a significação de tal comparação. Mas realmente crê que, à medida que o seu conhecimento cresce, a sua representação da realidade se torna mais e mais simples, e explicativa de mais e mais coisas. E pode ainda crer na existência de limites para o conhecimento, e admitir que o espírito humano se aproxima desses limites. Esse extremo ideal será «a verdade objectiva».

## UMA PISTA QUE PERMANECE

Quando começamos a estudar mecânica temos a impressão de que tudo nesta ciência é simples, fundamental e fixo para todo o sempre. Dificilmente suspeitaríamos de uma pista que passou despercebida trezentos anos. Essa pista liga-se a um dos conceitos fundamentais da mecânica — o conceito de *massa*

Voltemos de novo à experiência idealizada do carrinho sobre a superfície perfeitamente lisa. Se o carrinho inicialmente parado recebe um impulso, passará a mover-se uniformemente com certa velocidade. Suponhamos que a acção da força possa ser repetida tantas vezes quantas quisermos, com o mecanismo do impulso actuando no mesmo sentido e exercendo a mesma força. Por mais que a experiência se repita, a velocidade final é sempre a mesma. Mas que acontece se a experiência muda, se o carrinho estava a princípio vazio e agora está carregado? O carrinho carregado terá no final uma velocidade menor que o carrinho vazio. A conclusão é: se a mesma força age em dois diferentes corpos, ambos inicialmente em repouso, as velocidades resultantes não serão as mesmas. Daí dizermos que a velocidade depende da massa do corpo, sendo menor se a massa é maior.

Sabemos, portanto, pelo menos em teoria, como determinar a massa de um corpo, ou, mais exactamente, quantas vezes uma dada massa é maior que outra. Temos forças idênticas actuando em duas massas em repouso. Se verificamos que a velocidade da primeira é três vezes maior que a da segunda, concluímos que a primeira massa é três vezes menor que a segunda. Não é isto, certamente, um meio prático de determinar a relação de duas massas. Mas fizemo-lo baseados na aplicação da lei da inércia.

Como na prática determinar a massa? De nenhum modo da maneira acima descrita. Todo o mundo sabe o melhor sistema: pesando o corpo na balança.

Vejamos mais detalhadamente os dois meios de determinar massas.

A primeira experiência nada tem com a gravidade ou atracção da Terra. Depois de recebido o impulso, o carrinho move-se para a frente sobre o plano perfeitamente liso e horizontal. A força da gravidade que o faz manter-se sobre esse plano não muda e não representa nenhum papel na determinação da massa. Já tudo muda na balança. Não poderíamos

usá-la se a Terra não atraísse os corpos, se a gravidade não existisse. A diferença entre as duas determinações de massa é que a primeira nada tem com a gravidade e a segunda se baseia nela essencialmente.

Perguntamos: obteremos iguais resultados se determinarmos a relação de duas massas pelos dois processos acima descritos? A resposta experimental é clara. Os resultados são exactamente os mesmos! Esta conclusão não tinha sido prevista; baseou-se na observação, não na razão. Por amor à simplicidade chamemos à massa determinada pelo primeiro modo, *inercial*; e à determinada pelo segundo, *gravitacional*. No nosso mundo acontece que são iguais, mas podemos imaginar que não o fossem. Nova questão se ergue imediatamente: essa identidade dos dois tipos de massa será puramente acidental ou possui significação mais profunda? A resposta da velha física é: a identidade das duas massas é acidental e nenhuma significação mais profunda lhe pode ser atribuída. A resposta da física moderna é o oposto: a identidade das duas massas é fundamental e constitui uma pista nova essencial que leva a uma compreensão mais profunda. Isto foi, de facto, uma das mais importantes pistas de que se desenvolveu a chamada teoria da relatividade.

Uma novela policial parecerá de inferior qualidade, se explica os acontecimentos estranhos como meros acidentes. Muito mais satisfatória será, se seguir um plano racional. Assim também a teoria que oferece explicação para a identidade da massa inercial e gravitacional é superior à que a interpreta como meramente acidental — contanto que, sem dúvida, as duas teorias sejam igualmente justificadas pela observação dos factos.

Como a identidade das duas massas foi básica para a formulação da teoria da relatividade, estamos justificados de examiná-la aqui um pouco mais de perto. Que experiências

demonstram que as duas massas são as mesmas? Galileu fez cair diferentes massas do alto de uma torre e verificou que o tempo gasto na queda era sempre o mesmo, isto é, que o movimento do corpo que cai não depende da massa. Para ligar à identidade das duas massas o resultado desta experiência tão simples, mas tão importante, temos de recorrer a um complicado raciocínio.

Um corpo em repouso cede à acção de uma força externa, move-se e atinge uma certa velocidade. Cede mais ou menos facilmente, de acordo com a sua massa inercial; resiste mais ao movimento, se a massa é maior; e menos, se é menor. Podemos dizer, embora não em rigor: a prontidão com que um corpo responde ao apelo de uma força externa depende da sua massa inercial. Se fosse verdade que a Terra atrai todos os corpos com a mesma força, a maior massa inercial mover-se-ia mais lentamente na queda do que qualquer outra menor. Mas não é esse o caso; todos os corpos caem da mesma maneira. Isto significa que a força com a qual a Terra atrai diferentes massas deve ser diferente. A Terra atrai a pedra com a força da gravidade, sem nenhuma atenção para com a sua massa inercial. A força de «apelo» da Terra depende da massa gravitacional. O movimento de «resposta» da pedra depende da sua massa inercial. Desde que o movimento de «resposta» é sempre o mesmo — todos os corpos largados da mesma altura caem da mesma maneira — temos que concluir que a massa inercial e a gravitacional são iguais.

O físico formula mais pedantescamente essa conclusão: a aceleração de um corpo que cai cresce na proporção da sua massa gravitacional e decresce na proporção da sua massa inercial. E desde que todos os corpos que caem apresentam a mesma aceleração, as duas massas devem ser iguais.

Na nossa grande novela policial não existem problemas resolvidos definitivamente para todo o sempre. Após trezentos anos de estagnação retornamos ao problema inicial do movi-

mento, para rever o processo de investigação e descobrir pistas que passaram despercebidas — adquirindo nós assim uma diferente representação do Universo.

## É O CALOR UMA SUBSTÂNCIA?

Aqui começamos a seguir uma nova pista no reino dos fenómenos do calor. Impossível, todavia, separar a ciência em secções sem ligação. Breve verificaremos que os novos conceitos agora introduzidos se entrelaçam com os que já nos são familiares e com os que vamos estudar. Uma linha de pensamento que se desenvolve num ramo da ciência pode muitas vezes ser aplicada à descrição de coisas de carácter na aparência diverso. Neste processo os conceitos originais são frequentemente modificados de modo a atender aos dois fins.

Os conceitos fundamentais do fenómeno «calor» são *temperatura* e *calor*. Muito tempo levou a ciência para estabelecer esta distinção, mas depois que a estabeleceu os progressos foram rápidos. Embora sejam conceitos familiares a toda a gente, vamos examiná-los de perto para lhes acentuar as diferenças.

O nosso sentido do tacto diz-nos que um corpo está quente e outro frio. Mas é um critério puramente qualitativo, insuficiente para uma descrição quantitativa — e às vezes ambíguo. Uma simples experiência o prova: temos três vasos, com água quente, morna e fria. Se mergulharmos uma das mãos na água quente e a outra na fria, recebemos a impressão do quente e do frio. Se depois disso mergulhamos as duas mãos na água morna recebemos duas impressões contraditórias, uma em cada mão. Pelo mesmo motivo um esquimó e um equatorial que num dia de Primavera se encontrem em Nova Iorque terão opiniões diferentes sobre se o clima é frio ou quente. Nós resolvemos essas dúvidas por meio do termómetro, um instrumento concebido por Galileu. De novo ele! O uso do termómetro baseia-se em algumas óbvias conjecturas físicas. Vamos

transcrever algumas linhas de Black, fixadas século e meio atrás, e que contribuíram para esclarecer os conceitos de temperatura e calor.

Por meio deste instrumento podemos verificar que, se tomarmos mil ou mais coisas diferentes, como metais, pedras, sais, madeiras, lãs, água e uma variedade de outros líquidos, todos de diferentes *calores*, e os pusermos num mesmo recinto sem aquecimento e no qual o sol não penetre, o calor comunicar-se-á entre esses corpos do mais quente para o mais frio, durante horas, talvez, ou no curso de um dia; e, se ao cabo o medirmos com o termómetro, veremos que esses objectos indicarão o mesmo grau.

A palavra «calores» é o que hoje chamamos *temperaturas*.

Um médico que tira o termómetro da boca de um doente pode raciocinar assim: «O termómetro indica a sua própria temperatura pela extensão da coluna de mercúrio. Sabemos que a extensão dessa coluna cresce na proporção do aumento de temperatura. Mas o termómetro esteve alguns minutos em contacto com o meu doente de modo que o doente e o termómetro ficaram com a mesma temperatura. Concluo, portanto, que a temperatura do meu doente está registada no termómetro.» Na prática esse médico agirá de modo mecânico, sem pensar que está aplicando princípios físicos.

Mas contém o termómetro a mesma soma de calor do corpo humano? Claro que não. Afirmar que dois corpos contêm iguais quantidades de calor só porque as temperaturas são iguais, seria, como Black notou,

«...concluir muito apressadamente. Seria confundir a quantidade de calor em diferentes corpos com a intensidade do calor e sendo claro que quantidade e intensidade são coisas diferentes, devemos sempre distingui-las quando pensamos na distribuição do calor.»

Melhor compreensão desta diferença pode ser alcançada com uma experiência muito simples. Um litro de água colocada sobre um bico de gás leva algum tempo para ir da temperatura ambiente ao ponto de fervura. Muito mais tempo será requerido para ferver doze litros de água na mesma chama e na mesma vasilha. Temos de interpretar este facto como indicativo de que mais «alguma coisa» se necessita ali — e essa alguma coisa é o que chamamos *calor*.

*Calor específico*: este importante conceito é-nos dado pela experiência de uma vasilha com água e de outra com mercúrio, submetidas ao mesmo processo de aquecimento. O mercúrio aquece muito mais depressa que a água, mostrando assim que muito menos «calor» se torna necessário para elevar de um grau a sua temperatura. Em regra, diferentes quantidades de calor são necessárias para mudar de um grau, digamos de quinze a dezasseis graus, as temperaturas de diferentes substâncias, tais como água, mercúrio, ferro, cobre, madeira, etc., todas com a mesma massa. Dizemos que cada substância tem a sua capacidade individual de calor — ou *calor específico*.

Uma vez apreendido o conceito de calor podemos investigar mais de perto a sua natureza. Temos dois corpos, um quente, outro frio, isto é, um em temperatura mais alta que outro. Ponhamo-los em contacto, livres de qualquer influência externa. Acabarão por adquirir a mesma temperatura. Mas que aconteceu? Que aconteceu entre o instante em que esses corpos entram em contacto e aquele em que se igualam em temperatura? O calor «fluiu» de um corpo para outro — a mesma imagem da água que flui de um nível mais alto para um mais baixo. A representação disto, conquanto primitiva, adequa-se a muitos factos, de modo que a analogia serve.

Água — Calor
Nível mais alto — Temperatura mais alta
Nível mais baixo — Temperatura mais baixa

A corrente perdura até que ambos os níveis e ambas as temperaturas se igualem. Esta ingénua representação pode ser acentuada por meio de considerações quantitativas. Se massas determinadas de água e álcool, cada uma a certa temperatura, são misturadas, o conhecimento dos respectivos calores específicos pode levar-nos a predizer a temperatura final da mistura. Inversamente, a observação da temperatura final, junta com um pouco de álgebra, pode habilitar-nos a encontrar a relação dos dois calores específicos.

Reconhecemos no conceito do calor que aqui aparece similaridade com outros conceitos físicos. O calor é, segundo esse ponto de vista, uma substância, como a massa na mecânica. A sua quantidade pode mudar ou não, como o dinheiro pode ser posto num cofre ou gasto. A soma de dinheiro num cofre permanece inalterada, enquanto o cofre permanece fechado; assim também a quantidade de massa e de calor num corpo isolado. Mais, tal como a massa de um sistema isolado não muda ainda que uma transformação química se realize, assim o calor se conserva ainda que passe de um corpo para outro. Ainda que o calor não seja usado para elevar a temperatura de um corpo mas sim para derreter gelo, ou para mudar água em vapor, podemos julgá-lo como substância e novamente reavê-lo congelando a água ou liquefazendo o vapor. Os velhos nomes — calor latente de fusão ou vaporização — mostram que estes conceitos decorrem da ideia de calor como substância. O calor latente está temporariamente oculto, como o dinheiro que está oculto mas é utilizável se alguém consegue abrir o cofre.

O calor, porém, não é uma substância no mesmo sentido que a massa. A massa pode ser averiguada por meio da balança — mas o calor? Um pedaço de ferro frio pesa mais do que quando em brasa? A experiência mostra que não. Se o calor é uma substância, será então uma substância sem peso. O «calor-substância» foi usualmente chamado *calórico* e representou o nosso primeiro contacto com a grande família das substân-

cias sem peso. Mais adiante teremos oportunidade de conhecer a história desta família, a sua ascensão e queda. Por enquanto basta assinalarmos o nascimento deste membro. O propósito de qualquer teoria física é explicar o maior número possível de fenómenos. Ela é tanto mais aceitável quanto mais factos torne compreendidos. A teoria do calor-substância explica muitos dos fenómenos caloríficos. Entretanto, logo se verá que também esta é uma falsa pista, e que o calor não pode ser considerado como uma substância sem peso. Isto será claro se nos reportarmos a singelas experiências que foram realizadas no princípio da nossa civilização.

A nossa ideia de substância é a de uma coisa que não pode ser criada nem destruída. Os homens primitivos entretanto produziam por meio da fricção o calor necessário para queimar a madeira. Os exemplos de calor por fricção mostram-se de tal forma abundantes que não vale a pena mencioná-los. Em todos os casos uma certa quantidade de calor é criada — facto difícil de acomodar-se à ideia do calor-substância. Não há dúvida que um defensor da ideia aduzirá argumentos a favor. O seu raciocínio será este: «A teoria da substância pode explicar a aparente criação do calor. Tomemos o caso de dois pedaços de madeira friccionados um contra o outro. O acto de friccionar é algo que influencia a madeira e lhe muda as propriedades. É muito provável que as propriedades sejam modificadas de modo que uma quantidade fixa de calor venha a produzir uma temperatura mais alta que a anterior. No fim de tudo, a única coisa que observamos é o aumento de temperatura. É possível que a fricção mude o calor específico da madeira e não a soma total do calor.»

Neste ponto do debate seria inútil arguir com um adepto da teoria da substância, porque o assunto só poderia ser resolvido pela experiência. Imaginemos dois pedaços de madeira idênticos e suponhamo-los submetidos a iguais mudanças de temperatura, obtidas por diferentes métodos: num caso, pela fricção e em outro caso, pela acção de um irradiador de calor.

Se os dois pedaços apresentarem o mesmo calor específico sob a nova temperatura, a teoria do calor-substância desaba. Há métodos muito simples de determinar o calor específico — e o julgamento final da teoria depende dessas mensurações. Experiências com capacidade de dar sentença de vida e morte a uma teoria são frequentes na história da física — e chamam-se experiências *cruciais*. O valor crucial de uma experiência revela-se unicamente pelo modo de formular a questão, e apenas uma teoria do fenómeno pode ser levada a esse tribunal. A determinação dos calores específicos de dois corpos da mesma espécie, em igual temperatura, obtida pela fricção ou pelo fluxo do calor de um para outro corpo, é exemplo típico de uma experiência crucial. Foi realizada há século e meio por Rumford — resultando em golpe de morte para a teoria do calor-substância.

«Acontece com frequência», diz Rumford, «que no curso ordinário da vida se apresentam oportunidades para a contemplação de algumas das suas mais curiosas operações da Natureza; e experiências filosóficas de muito interesse podem ser feitas quase sem trabalho e gastos, por meio de maquinismos construídos para os propósitos mecânicos das artes e manufacturas.»

Muitas vezes tenho tido o ensejo de fazer esta observação; estou persuadido de que o hábito de ter os olhos abertos para tudo que se faz na vida diária nos tem levado, seja por mero acidente, seja por sugestão da imaginativa, a fecundas dúvidas e sérios planos de investigação e melhoria, em grau muito maior que a mais intensa meditação dos filósofos nas horas dedicadas expressamente ao estudo...

Estando eu ultimamente dirigindo a perfuração de um canhão no arsenal de Munique, fiquei impressionado pelo alto grau de calor que o bronze rapidamente adquire durante a operação de ser furado; e com o calor ainda mais intenso

(maior que o da água em fervura, como verifiquei) da cisalha cortada pelo instrumento perfurante...

De onde vem o calor que surge nessa operação mecânica? Será fornecido pela cisalha que o instrumento perfurante destaca da massa do metal?

Se o caso fosse esse, então, de acordo com as teorias modernas do calor latente e do calórico, a sua capacidade calorífica deveria não somente mudar, mas a mudança sofrida deveria ser suficientemente grande para explicar todo o calor produzido.

Mas nenhuma mudança se verifica; porque observei que, tomando pesos iguais dessa cisalha e de fragmentos do mesmo metal destacados por meio de uma serra, aquecendo-os à mesma temperatura (a da água em ebulição) e pondo-os em igual quantidade de água fria (59 ½ F.), a porção de água que recebeu a cisalha não foi, aparentemente, nem mais nem menos aquecida que a que recebeu os fragmentos serrados.

E depois extraí a conclusão:

Raciocinando sobre este assunto, devemos não nos esquecer de considerar a notável circunstância de que a fonte do calor gerado pela fricção nessas experiências parece inexaurível.

É desnecessário acrescentar que qualquer coisa que, num corpo *isolado*, ou num sistema de corpos, pode, sem *limitação*, continuar a ser fornecida, não pode ser uma *substância material*; e a mim me parece extremamente difícil, se não impossível, formar qualquer ideia sobre qualquer coisa capaz de ser excitada e transmitida da maneira pela qual o calor é excitado e transmitido nestas experiências, excepto o MOVIMENTO.

Assistimos aqui ao desabamento da velha teoria; ou, para sermos mais exactos, vemos que a teoria da substância se limita aos problemas do movimento do calor. E novamente, como

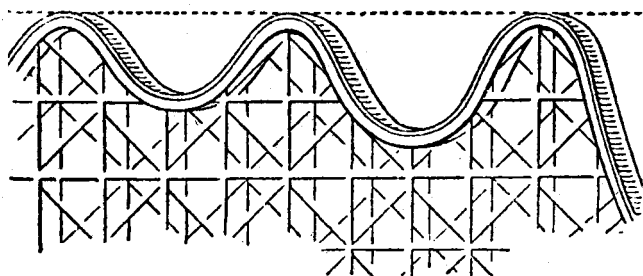
Rumford sugere, temos que procurar outra pista. Ponhamos momentaneamente à margem o problema do calor e voltemos à mecânica.

## A MONTANHA-RUSSA

Eis-nos diante desse divertimento popular chamado montanha-russa. Um carrinho é levado ao ponto mais alto de uma linha de trilhos. Entregue lá à força de gravidade, descai, e sobe e desce pela linha fantasticamente curva, dando aos que vão dentro todas as sensações violentas das súbitas mudanças de velocidade... O carrinho parte sempre do ponto mais alto. Em parte nenhuma do percurso alcança ponto mais alto que aquele. A completa descrição do seu movimento seria complicada. De um lado temos o aspecto mecânico do problema, as mudanças de velocidade e de posição no tempo. Do outro lado temos o atrito e portanto a criação de calor nas rodas e nos trilhos. Separamos nestes dois aspectos o processo físico a fim de possibilitar o uso dos conceitos anteriormente discutidos. A divisão conduz-nos a uma experiência ideal, porque um processo físico no qual só apareça o aspecto mecânico pertence ao campo da imaginação, não ao da realidade.

Para essa experiência idealizada temos de supor que alguém descobriu como eliminar totalmente o atrito que sempre acompanha o movimento. Esse alguém decide-se a aplicar a sua descoberta à construção de uma montanha-russa e tem de descobrir por si mesmo como armá-la. O carrinho tem que correr para cima e para baixo, com o ponto de partida, digamos, a cem metros do chão. Pelo processo de «experiência e erro» o construtor vê que deve seguir regra muito simples: a linha pode ser do comprimento que for, contanto que não tenha ponto nenhum mais alto que o da partida. Se o carrinho está livre de correr até ao fim da linha, poderá no percurso chegar a cem metros de altura quantas vezes queira, mas nunca passar disso. Na realidade não será assim, porque existe o

atrito; não poderá depois da partida subir à mesma altura do ponto da partida — por causa do atrito; mas na nossa experiência idealizada o hipotético engenheiro suprimiu o atrito.

Vamos seguir o movimento desse carrinho a partir desses cem metros. À proporção que ele se move, a distância a que está do chão diminui, mas a sua velocidade aumenta. À primeira vista esta observação lembra-nos aquele exemplo de linguagem: «Eu não tenho nenhum lápis, mas você tem seis

laranjas» — mas não é coisa tão estúpida como parece. Porque se não há nenhum nexo entre um não ter lápis e outro ter seis laranjas, existe uma real ligação entre a distância do carrinho ao chão e a sua velocidade. Podemos a qualquer momento calcular a velocidade do carrinho se soubermos em que altura ele está nesse momento; mas aqui vamos saltar por cima deste aspecto quantitativo, que só por meio de fórmulas matemáticas pode ser bem expressado.

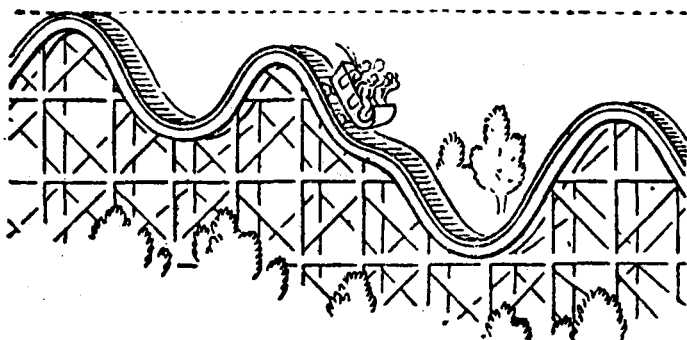
No ponto de partida, o mais alto, o carrinho está com zero velocidade e a cem metros do chão. No ponto mais baixo possível, não está separado do chão por distância nenhuma e atingiu o máximo da velocidade. Estes factos podem ser expressos de outra forma. No ponto mais alto o carrinho possui *energia potencial*, mas não possui *energia cinética* ou energia de movimento. No ponto mais baixo está no máximo da energia cinética e já sem nenhuma energia potencial. Em

todas as posições intermédias entre o ponto de partida e o de chegada terá ambas as energias, a potencial e a cinética. A energia potencial aumenta com a elevação; a cinética aumenta com a velocidade. Os princípios da mecânica bastam para explicar o movimento. Na linguagem matemática têm-se duas expressões para essas duas classificações da energia, ambas variáveis, embora a sua soma seja constante. Deste modo é possível introduzir rigorosamente os conceitos de energia potencial (dependente da posição) e de energia cinética (dependente da velocidade). A adopção desses nomes é sem dúvida arbitrária e só justificada pela conveniência. A soma das duas quantidades permanece invariável e é chamada «uma constante do movimento». A energia total, a potencial mais a cinética, pode ser comparada a uma substância, ao dinheiro, por exemplo, que, embora se mantenha numa quantidade fixa, pode continuamente mudar de uma moeda para outra, de dólares para libras, ou vice-versa, de acordo com uma certa taxa de câmbio.

Nas montanhas-russas reais em que o atrito não deixa que durante o percurso o carrinho alcance nenhum ponto da altura do inicial, há ainda um contínuo jogo de câmbio entre a energia potencial e a cinética. Mas aqui a soma total não permanece constante, e decresce.

Temos agora de arriscar um passo corajoso para estudar os aspectos térmicos e mecânicos do movimento. A riqueza de consequências e generalizações advindas desse passo será revelada depois.

Entra em cena algo mais do que a energia potencial e a cinética: o calor gerado pelo atrito. Será que este calor corresponde à diminuição dessas duas energias? Uma nova suposição está iminente. Se olharmos o calor como forma de energia, talvez a soma dos três (energia potencial, energia cinética e calor) permaneça constante. Não somente o calor, mas o calor e outras formas de energia são, como a substância, indes-

trutíveis. É como se um homem tivesse de pagar a si próprio certa comissão em francos para trocar dólares por libras, conservando ele o dinheiro da comissão de modo que a soma de

dólares, libras e francos permanecesse uma quantia fixa, de acordo com certa taxa de câmbio.

O progresso da ciência destruiu o velho conceito do calor como substância. Experimentamos agora criar uma nova substância — a energia, da qual o calor é uma das formas.

## A TAXA DE CÂMBIO

Há menos de um século a nova pista que levava ao conceito do calor como forma de energia foi pressentida por Mayer e experimentalmente confirmada por Joule. Parece-nos estranha coincidência que quase todos os trabalhos fundamentais relativos à natureza do calor fossem realizados por físicos não-profissionais, simples amadores. Temos o versátil escocês Black, o alemão Mayer, o grande aventureiro americano Conde de Rumford, que se passou para a Europa e entre outras coisas

foi ministro da Guerra na Baviera. Temos ainda o cervejeiro inglês Joule, que nos seus momentos de lazer, realizou algumas das mais importantes experiências relativas à conservação da energia.

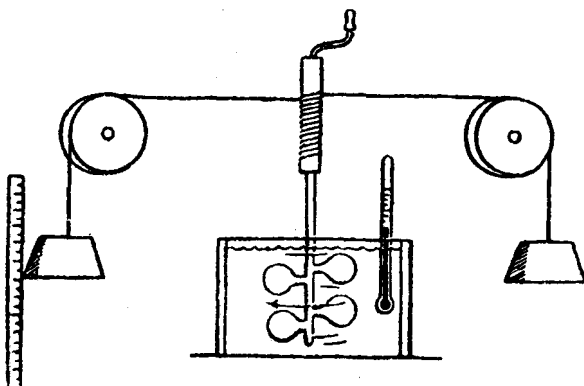
Joule verificou experimentalmente a hipótese do calor como forma de energia e determinou a taxa de câmbio. Vejamos as suas experiências.

A energia cinética e potencial de um sistema constitui a energia *mecânica* desse sistema. No caso da montanha-russa fizemos a suposição de que parte da energia mecânica se tinha convertido em calor. Se isto está certo, deve haver aqui, e em todos os processos físicos similares, uma definida *taxa de câmbio* entre o calor e a energia mecânica. Embora questão quantitativa, o facto de uma dada quantidade de energia mecânica poder mudar-se numa definida quantidade de calor, é da maior importância. Gostaríamos de saber qual o número que expressa semelhante taxa de câmbio, isto é, quanto calor obtemos de uma dada quantidade de energia mecânica.

A determinação deste número foi objecto das investigações de Joule. O mecanismo de uma das suas experiências lembra o de um relógio de pesos. A «corda» de tais relógios consiste em elevar dois pesos que o abastecem de energia potencial. Gradualmente os pesos descem e o maquinismo do relógio anda. No fim de certo tempo os pesos chegam à posição mais baixa e o relógio pára. Que sucedeu com a energia? A energia potencial dos pesos mudou-se em energia cinética e gradualmente se dissipou em calor.

Uma hábil alteração neste maquinismo habilitou Joule a medir o calor perdido e a estabelecer a taxa de câmbio. No seu aparelho, os dois pesos faziam girar dentro de água um eixo com palhetas.

A energia potencial dos pesos transformava-se na energia cinética das partes móveis e depois em calor, o qual elevava a temperatura do líquido. Joule mediu esta mudança de tem-

peratura; fazendo uso de um dado conhecido, o calor específico da água, calculou a soma do calor absorvido. Os seus resultados resumem-se assim:

1) A quantidade de calor produzido pela fricção dos corpos, sejam sólidos ou líquidos, é sempre proporcional à quantidade de força (ou energia, como dizemos) despendida.

2) A quantidade de calor capaz de aumentar de um grau Fahr. a temperatura de uma libra de água (pesada no vácuo entre cinquenta e cinco e sessenta graus) requer para a sua produção o dispêndio de uma força mecânica (energia) representada pela queda de setecentas e setenta e duas libras, da altura de um pé [1].

Por outras palavras: a energia potencial de setecentas e setenta e duas libras elevadas a um pé acima do chão é equivalente à quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma libra de água de cinquenta e cinco a cinquenta e seis graus Fahr. Posteriores experiências deram

[1] 60° F são aproximadamente 15° centígrados. A libra pesa 453,6 grs. O pé mede 0,m33.

resultados ainda mais precisos, mas o equivalente mecânico do calor é essencialmente uma contribuição de Joule.

Depois deste importante passo, os progressos foram intensos. Admitiu-se que estas espécies de energia, a mecânica e a térmica, não passam de duas das muitas formas de energia. Tudo que pode ser convertido em alguma forma de energia é também uma forma de energia. A radiação emitida pelo Sol é energia, porque parte se transforma em calor na Terra. Uma corrente eléctrica possui energia, porque aquece um arame ou faz girar as rodas de um motor. O carvão representa energia química, a qual se liberta quando o carvão é queimado. Em cada evento da Natureza uma forma de energia está sendo convertida noutra, sempre segundo uma bem definida taxa de câmbio. Num sistema fechado, isto é, isolado de influências externas, a energia conserva-se, e por isso comporta-se como uma substância. A soma de todas as formas de energia em tal sistema é constante, embora a quantidade de cada uma seja variável. Se olharmos o Universo como um sistema fechado podemos orgulhosamente proclamar, com os físicos do século XIX, que a energia do Universo é fixa — não se cria nem se destrói.

Os nossos dois conceitos de substância, portanto, são: *matéria* e *energia*. Ambos obedecem à lei da conservação: um sistema isolado não pode mudar nem em massa, nem em energia total. A matéria possui peso; a energia, não. Temos, pois, dois diferentes conceitos e duas leis de conservação. Será possível ainda hoje conservar essas ideias? Ou foram minadas pelos novos desenvolvimentos do saber humano? Sim! A teoria da relatividade alterou esses conceitos, como veremos adiante.

## O FUNDO FILOSÓFICO

Frequentemente os resultados da investigação científica forçam mudanças na visão filosófica dos problemas que escapam aos domínios estreitos da ciência. Qual o objectivo da

ciência? Que pedimos à teoria que tenta descrever a Natureza? Estas questões, embora ultrapassem o âmbito da física, estão-lhe intimamente ligadas, desde que a ciência constitui o material que lhes dá origem. As generalizações filosóficas têm que ser baseadas em resultados científicos. Mas, uma vez lançadas e aceites, essas generalizações influenciam os ulteriores desenvolvimentos do pensamento científico, fixando uma das muitas linhas possíveis de marcha. Rebeliões vitoriosas contra pontos de vista aceites dão como consequência desenvolvimentos imprevistos, que determinam novas visões filosóficas. Estas observações parecem vagas — e parecê-lo-ão, enquanto não forem ilustradas com exemplos tirados da história da física.

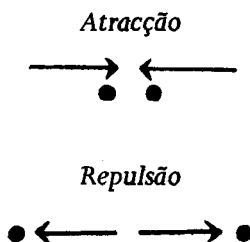
Procuraremos descrever as primeiras ideias filosóficas sobre os alvos da ciência. Estas ideias grandemente influenciaram a evolução da física até há cem anos, mas a sua remodelação foi imposta por novas evidências, novos factos e teorias, os quais, por sua vez, passaram a formar o novo «background» ou fundo da ciência.

Na história da ciência, desde a filosofia grega até à física moderna, constantes tentativas foram feitas para reduzir a aparente complexidade dos fenómenos naturais a algumas ideias e relações simples e básicas. Esta preocupação está no âmago de todas as filosofias — e aparece até na concepção dos atomistas. Há vinte e três séculos Demócrito escreveu:

Por convenção, o doce é doce; por convenção, o amargo é amargo; por convenção, o quente é quente; por convenção, a cor é cor. Mas na realidade só há átomos e vácuo. Isto é, os objectos que os nossos sentidos sentem só supostamente são reais. Só o átomo e o vácuo têm realidade.

Esta ideia surge na antiga filosofia apenas como engenhosa ficção imaginativa. As leis da Natureza eram desconhecidas dos Gregos. Ciência que ligasse teoria e experiência foi

coisa começada com Galileu. Já seguimos as pistas iniciais que nos levaram às leis do movimento. Através de duzentos anos de investigação, a força e a matéria permaneceram como conceitos básicos de todas as tentativas de compreensão da Natureza. É impossível imaginar uma sem a outra, porque a matéria demonstra a sua existência como fonte de força pela sua acção sobre outra matéria.

Consideremos o mais elementar dos casos: duas partículas com forças actuantes entre si. A força mais elementar que podemos conceber é a da atracção e repulsão. Nos dois casos os vectores das forças estão na linha que liga os pontos materiais. As exigências da simplicidade levam-nos a representar do seguinte modo a atracção e repulsão das partículas:

Qualquer outra suposição relativa à direcção das forças actuantes, daria uma representação gráfica muito mais complicada. Será possível traçar uma representação igualmente simples do comprimento dos vectores das forças? Desejando evitar suposições muito especiais, podemos dizer uma coisa: a força entre duas partículas só depende da distância que há entre elas, como no caso da força de gravidade. Isto parece bastante simples. Poderíamos figurar forças muito mais complicadas, como as que dependem não só da distância como também da velocidade das duas partículas. Tomando a matéria e a força como nossos conceitos fundamentais, dificilmente

podemos imaginar suposição mais simples do que a de forças actuando ao longo da linha que liga as partículas e que só dependem da distância entre as partículas. Mas será possível descrever todos os fenómenos físicos por meio apenas de forças deste tipo?

As grandes realizações da mecânica em todos os sectores, a sua vitória do desenvolvimento da astronomia, a aplicação das suas ideias a problemas aparentemente não-mecânicos, tudo contribuiu para a crença de que *é* possível descrever todos os fenómenos naturais como simples forças actuantes entre objectos inalteráveis. Durante dois séculos, a partir de Galileu, consciente ou inconsciente, essa preocupação transparece em quase todas as criações científicas. Foi claramente formulada por Helmholtz em meados do século XIX:

Finalmente, portanto, descobrimos que o problema da ciência física consiste em reduzir os fenómenos naturais a forças de atracção e repulsão, permanentes e de intensidade dependente da distância. A solubilidade deste problema é condição para a completa compreensibilidade da Natureza.

Assim, de acordo com Helmholtz, a linha do desenvolvimento da ciência é determinada e segue estritamente um curso fixo:

A sua vocação terminará logo que a redução dos fenómenos naturais a simples forças se complete e fique provado que é essa a única redução possível para esses fenómenos.

Esta visualização parece ingénua para um físico de hoje. Causa-nos medo pensar que a maravilhosa aventura da inves-

tigação possa tão depressa chegar a termo, com uma fria e infalível representação do Universo fixada para sempre.

Conquanto esses dogmas pretendam reduzir a descrição de tudo a simples forças, deixam em aberto a questão de como as forças podem depender da distância. É possível que para diferentes fenómenos a dependência seja diversa. A necessidade de introduzir muitas diferentes espécies de forças para os diferentes eventos não se revela satisfatória do ponto de vista filosófico. Não obstante, o chamado *ponto de vista mecânico*, tal como foi formulado por Helmholtz, desempenhou importante papel no seu tempo. O desenvolvimento da teoria cinética da matéria vale por uma das grandes conquistas directamente influenciadas pelo ponto de vista mecânico.

Antes de estudarmos o seu declínio, aceitemos provisoriamente o ponto de vista dos físicos do século passado e vejamos que conclusões permite, relativas à compreensão do mundo exterior.

## A TEORIA CINÉTICA DA MATÉRIA

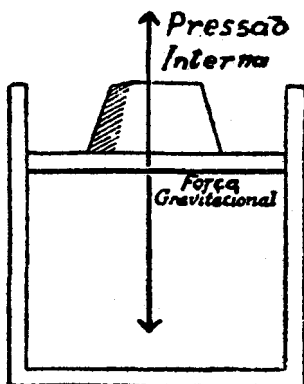
Será possível explicar o fenómeno do calor como o resultado do movimento de partículas que se entrechocam? Um vaso fechado contém certa massa de gás, de ar, por exemplo, numa certa temperatura. Aquecendo-o, elevamos a temperatura e desse modo aumentamos a energia. Mas que relação existe entre este calor e o movimento? A possibilidade de uma relação é sugerida tanto pelo nosso ponto de vista filosófico quanto pelo conceito de que o calor se gera do movimento. O calor tem de ser energia mecânica, já que todos os problemas são mecânicos. Apresentar a esta luz o conceito de matéria é o objecto da *teoria cinética*. De acordo com tal teoria um gás não passa da congregação de enorme número de partículas, ou *moléculas*, que se movem em todas as direcções, colidindo entre si e mudando a direcção do movimento a cada colisão. Deve existir para as moléculas uma velocidade média,

como numa grande cidade existe uma média de idade ou de riqueza. Haverá, portanto, uma média de energia cinética por partícula. Mais calor no vaso significará maior média de energia cinética. Assim, dentro deste ponto de vista, o calor não é uma forma especial de energia diferente da energia mecânica, mas simplesmente a energia cinética do movimento molecular. A qualquer temperatura definida corresponde uma média de energia cinética por molécula. Se desejamos ter uma representação mecânica da matéria somos forçados a olhar a energia cinética de uma molécula como medida de temperatura do gás.

Esta teoria não é um puro jogo de imaginação. Não só está de acordo com a experiência, como nos leva a uma compreensão mais profunda dos factos. Alguns exemplos ilustrarão as nossas palavras.

Temos um vaso fechado por um pistão que pode ser movido facilmente. O vaso contém certa quantidade de gás mantido em temperatura constante. Se o pistão está inicialmente em descanso em qualquer posição, pode ser movido para baixo pela acção de um peso e movido para cima pelo afastamento desse peso. Para impeli-lo para baixo uma força tem que ser usada contra a pressão do gás. Qual na teoria cinética o mecanismo desta pressão interna? O tremendo número de partículas que constituem o gás e se movem em todas as direcções. Essas partículas bombardeiam as paredes do pistão, como bolas elásticas que batem num muro e voltam. O continuado bombardeio conserva o pistão em certa altura, opondo-se à força da gravidade do pistão e do peso que o impele para baixo. Há uma força gravitacional constante numa direcção; noutra, há os inúmeros choques irregulares das moléculas. O efeito sobre o pistão de todas estas pequenas forças irregulares deve ser igual ao da força da gravidade logo que haja equilíbrio.

Suponhamos que o pistão é empurrado para baixo de modo a comprimir o gás a uma fracção do volume primitivo, digamos, à metade, sem que a temperatura sofra mudança. Que pode-

remos esperar de acordo com a teoria cinética? Mostrar-se-á a força vinda do bombardeio mais ou menos actuante do que antes? As moléculas estão agora mais aglomeradas. Apesar da média da energia cinética ser a mesma, a colisão das partículas de encontro ao pistão torna-se mais frequente e portanto a

força total é maior. Claro, pois, que é preciso mais peso para manter o pistão nesse ponto mais baixo.

Consideremos outra experiência. Suponhamos dois vasos com igual volume de dois gases, digamos hidrogénio e nitrogénio, ambos na mesma temperatura, ambos fechados por pistões iguais, acrescidos de pesos iguais. Em resumo: gases com o mesmo volume, temperatura e pressão. Desde que a temperatura é a mesma, de acordo com a teoria cinética também será a mesma a energia cinética média por partícula. Desde que as pressões são iguais, os dois pistões são bombardeados com a mesma força total. Em média, cada partícula conduz a mesma energia e ambos os vasos têm o mesmo volume. Portanto, *o número de moléculas em cada vaso deve ser o mesmo,* embora sejam quimicamente diversos os gases. Isto é de alta importância para a compreensão de muitos fenó-

menos químicos. Significa que o número de moléculas num dado volume, a certa temperatura e sob certa pressão, é característica não de um certo gás, mas de todos os gases. É admirável que a teoria cinética não só prediga a existência de tal número universal como ainda nos habilite a determiná-lo.

A teoria cinética da matéria explana quantitativa e qualitativamente as leis dos gases estabelecidas pela experiência. Além disso não se restringe aos gases, embora fosse neles que obtivesse maior triunfo.

Um gás pode ser liquefeito pelo abaixamento da temperatura. A queda da temperatura significa decréscimo da média de energia cinética das partículas. Torna-se, pois, claro que a energia cinética média de uma partícula líquida é menor que a de uma partícula do gás correspondente.

Uma frisante manifestação do movimento das partículas no líquido é-nos dada pelo chamado *movimento browniano*, notável fenômeno que permaneceria inexplicável se não fosse a teoria cinética da matéria. Foi pela primeira vez observado pelo botânico Brown, e explicado oitenta anos mais tarde, nos começos do nosso século. O aparelho necessário para a observação desse movimento é o microscópio.

Estava Brown examinando grãos de pólen de certas plantas, isto é, partículas ou grânulos de tamanhos variáveis entre dez e doze milésimos de centímetro.

E diz ele:

Enquanto eu examinava a forma dessas partículas imersas em água, observei que muitas estavam evidentemente em movimento... Repetidas observações mostraram-me que esses movimentos não provinham de correntes no líquido, nem da gradual evaporação, mas eram próprios das partículas.

O que Brown observou foi uma contínua agitação de grânulos suspensos na água e visíveis ao microscópio. Uma visão impressionante!

Seria o pólen de *certas* plantas essencial para a manifestação do fenómeno? Brown deu a resposta repetindo a experiência com o pólen de muitas plantas diferentes; verificou que todos os grânulos revelavam o mesmo movimento quando em suspensão na água. Além disso encontrou a mesma inquietação, o mesmo movimento irregular, nas partículas das substâncias orgânicas e inorgânicas. Até com o fragmento pulverizado de uma esfinge!

Como pode ser este movimento explicado? Parece contradizer todas as experiências anteriores. O exame da posição de uma partícula suspensa revela em cada trinta segundos a linha fantástica da sua trajectória. O admirável é o carácter aparentemente eterno do movimento. Um pêndulo em oscilação imerso na água deixa de oscilar se não for impelido por força externa. A existência de um movimento perpétuo contrariava todas as experiências. Mas essa dificuldade desapareceu à luz da teoria cinética da matéria.

Observando a água nos mais poderosos microscópios não podemos ver as suas moléculas em movimento. Temos de convir que, se a teoria da água como congregado de partículas é correcta, essas partículas devem ser de tamanho fora do alcance do melhor microscópio. Mas aceitemos a teoria e admitamo-la como a realidade.

As partículas brownianas visíveis ao microscópio são bombardeadas pelas partículas menores que compõem a água. O movimento browniano existe se as partículas bombardeadas são suficientemente minúsculas. Existe, porque o bombardeio não é uniforme de todos os lados em vista do seu carácter irregular. O movimento observado resulta, portanto, de um movimento inobservável. O comportamento das partículas maiores reflecte de algum modo o das moléculas, constituindo,

por assim dizer, uma ampliação tão larga que se torna apreensível ao microscópio. O carácter irregular e aleatório da órbita das partículas de Brown reflecte uma irregularidade semelhante nas partículas constituintes da água. Podemos, portanto, compreender que um estudo quantitativo do movimento browniano nos leva a uma visão mais dilatada da teoria cinética da matéria. Aparentemente o movimento visível de Brown depende do tamanho das moléculas bombardeadoras. Não existiria se todas as moléculas bombardeadoras não possuíssem uma certa quantidade de energia, ou, por outras palavras, se não tivessem massa e velocidade. Não admira, pois, que o estudo do movimento browniano possa levar-nos à determinação da massa da molécula.

Graças a laboriosa investigação teórica e experimental, os aspectos quantitativos da teoria cinética tomaram forma. A pista que o fenómeno do movimento de Brow forneceu trouxe-nos uma conclusão quantitativa. A mesma conclusão pode ser alcançada por outros caminhos. É muito importante o facto de todos estes métodos levarem à mesma conclusão, porque mostra a coerência da teoria cinética da matéria.

Só mencionaremos aqui um dos muitos resultados obtidos pela experiência e pela teoria. Suponha-se que temos um grama do mais leve de todos os elementos, o hidrogénio, e façamos a pergunta: quantas partículas existem nesse grama? A resposta caracterizará não só o hidrogénio como todos os outros gases, porque já sabemos sob que condições dois gases apresentam o mesmo número de partículas.

A teoria habilita-nos a responder a esta questão por meio de certas medidas do movimento de uma partícula browniana. E a resposta produz um número com muitos algarismos. O número de moléculas de um grama de hidrogénio é de

303.000.000.000.000.000.000.000

Se imaginarmos essas moléculas aumentadas de modo que se tornem visíveis ao microscópio, elas dariam para encher uma caixa quadrada de quatrocentos metros de lado.

Podemos com facilidade calcular a massa de uma molécula de hidrogénio dividindo 1 pelo numero acima. O resultado é um número fantasticamente minúsculo:

0,000 000 000 000 000 000 000 0033 gramas,

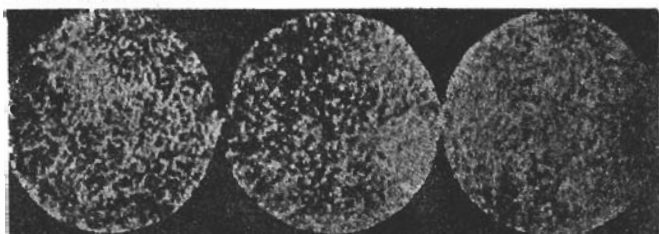
representando a massa de uma molécula de hidrogénio.

As experiências do movimento browniano fazem parte das muitas experiências independentes que também levam à determinação desse número.

Na teoria cinética da matéria e em todos os seus importantes aspectos vemos a realização de um programa filosófico geral: reduzir a explicação de todos os fenómenos a uma acção recíproca entre as partículas da matéria.

RESUMINDO:

*Na mecânica, a órbita de um corpo em movimento pode ser predita, e a órbita passada pode ser determinada, se conhecermos as suas condições presentes e as forças que agem sobre ele. Assim, por exemplo, a futura órbita de todos os planetas pode ser prevista. As forças activas são as forças gravitacionais de Newton, só dependentes da distância. Os grandes resultados da mecânica clássica sugerem que a concepção mecânica pode ser consistentemente aplicada a todos os ramos da física; e que todos os fenómenos podem ser explicados pela acção de forças representando a atracção ou a repulsão, dependentes apenas da distância e agindo entre partículas imutáveis.*

*Na teoria cinética da matéria vemos como esta concepção, saída de problemas mecânicos, abraça os fenómenos do calor, e como nos leva a uma aceitável representação da estrutura da matéria.*

*(Fotografia de J. Perrin)*

Partículas de Brown vistas ao microscópio

*(Fotografia de Brumberg e Vavilov)*

Partícula de Brown fotografada com longa exposição e cobrindo uma superfície

Consecutivas posições de uma partícula de Brown

A trajectória média dessas posições consecutivas

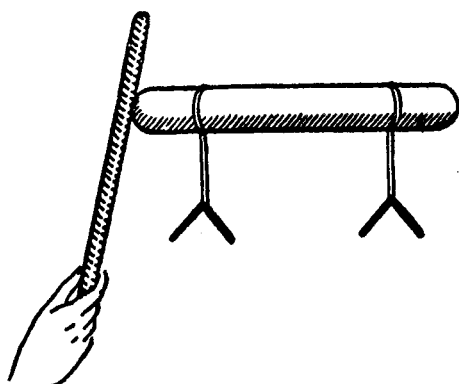
# DECLÍNIO DA CONCEPÇÃO MECANICISTA

## OS DOIS FLUIDOS ELÉCTRICOS

As páginas seguintes contêm um insulso relato de algumas experiências muito simples. Será um relato maçador, não só porque a simples descrição não tem o interesse da realização das experiências, como porque a significação dessas experiências não se torna clara antes que a teoria a ilumine. O nosso propósito é dar um sugestivo exemplo do papel da teoria na física.

1. Presa a um suporte de vidro temos uma barra de metal, cujas extremidades se ligam por um fio ao electroscópio. Que é o electroscópio? Um simples aparelho com duas folhas de ouro penduradas num dispositivo de metal, encerrado numa campânula de vidro e devidamente isolado. A experiência é a seguinte: antes de mais nada, ver se as folhas de ouro estão justapostas; é a posição em que normalmente devem estar. Se por acaso não estiverem nesta posição normal, um toque com o dedo na barra de metal as reunirá. Tomamos agora uma régua de borracha e depois de esfregá-la vigorosamente com flanela pomo-la em contacto com a barra de metal. Imediatamente as folhas de ouro se separam! E ficam separadas mesmo depois de interrompido o contacto da régua com a barra.

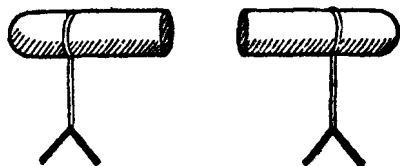
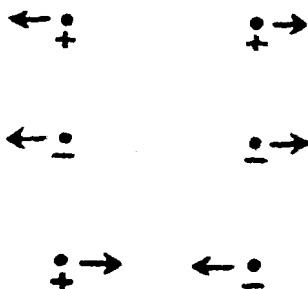
2. Numa segunda experiência juntamos outra vez as folhas de ouro, e depois de friccionada a régua aproximamo-la da barra de metal, sem realizar o contacto. Novamente as folhas de ouro se separam, mas desta vez não ficam separadas depois que a régua é afastada — justapõem-se normalmente.

3. Numa terceira experiência modificamos de leve o conjunto. A barra de metal é substituída por duas barras juntas. Friccionamos a régua e aproximamo-la da barra. As folhas

separam-se. Mas agora vamos desligar as duas barras, e retirar a régua. Que acontece? As folhas de ouro conservam-se separadas, em vez de se justaporem como na experiência anterior.

Não nos entusiasmemos com estas simples e ingénuas experiências. Quem as fizesse na Idade Média seria provavelmente encarcerado; para nós apresentam-se insípidas e ilógicas. Seria difícil repeti-las, depois de lidas, sem ficarmos confusos. Mas a teoria torna-as compreensíveis. Podemos dizer ainda mais: estas experiências não poderiam vir por acidente, sem a preexistência de ideias definidas sobre a sua significação.

Vamos expor a teoria que as explica.

Existem dois *fluidos eléctricos*, um chamado *positivo* (+) e o outro, *negativo* (—). São qualquer coisa como a substância no sentido já explicado — coisa susceptível de aumento ou diminuição, mas com total constante. Há, todavia, uma dife-

rença essencial entre este caso e o do calor, da matéria e da energia. Temos aqui duas substâncias eléctricas, e é impossível recorrer àquela comparação do dinheiro, salvo se generalizarmos um pouco mais. Um corpo acha-se electricamente em estado neutro quando os fluidos positivo e negativo se anulam mutuamente. Um homem nada possui ou porque realmente nada possua ou porque deve uma soma de dinheiro exactamente igual à que guarda no cofre.

A imediata conjectura é que dois fluidos eléctricos do mesmo tipo se repelem, e dois fluidos de tipos contrários se atraem. Isto pode ser graficamente representado desta maneira:

Uma final asserção se torna necessária. Há dois tipos de corpos, aqueles em que os fluidos se movem livremente, chamados *condutores*, e aqueles em que não se movem, chamados *isoladores*. Como de regra em tais casos, esta divisão não deve ser tomada com absoluto rigor. O condutor ou o isolador ideal é uma ficção que nunca pode ser realizada. Os metais, a terra, o corpo humano, são exemplos de condutores, embora de desiguais condutibilidades. O vidro, a borracha, a porcelana, são isoladores. O ar é parcialmente isolador, como quem leu a descrição das experiências já sabe. A humidade constitui sempre uma boa desculpa para o mau resultado das experiências electrostáticas, porque aumenta a condutibilidade do ar.

Estas asserções teóricas bastam para explicar as três experiências descritas. Vamos discuti-las mais uma vez, na mesma ordem, mas à luz da teoria dos fluidos eléctricos.

1. A régua de borracha, como todos os corpos em estado normal, é electricamente neutra. Contém os dois fluidos, o positivo e o negativo. A fricção com a flanela separa-os. Esta afirmativa é pura convenção; não passa da aplicação da terminologia criada teoricamente para explicar o processo da fricção. O tipo de electricidade que a régua tem em excesso depois é chamado negativo, nome puramente convencional. Se as experiências forem realizadas com um bastão de vidro friccionado com pele de gato, teremos de chamar positivo a esse excesso, para que tudo fique dentro da convenção. A fim de prosseguir na experiência, levamos o fluido eléctrico à barra de metal por meio do contacto da régua friccionada. O fluido move-se livremente nessa barra e nas folhas de ouro. Desde que a acção do fluido negativo sobre o positivo é de repulsão, as duas folhas procuram afastar-se o mais possível. A barra de metal repousa num suporte de vidro ou qualquer outro material isolador, de modo que o fluido que a régua lhe transmitiu nele permanece enquanto a condutibilidade do ar o permite. Compreendemos agora porque temos de tocar essa barra

antes do começo da experiência. Neste caso o metal, o corpo humano e a terra formam um vasto sistema condutor, com o fluido eléctrico de tal modo diluído que praticamente não fica nenhum no electroscópio.

2. Esta experiência começa como a primeira, mas a régua não toca na barra; aproxima-se só. Os dois fluidos no condutor, sendo livres de se moverem, separam-se, um atraído, outro repelido. E misturam-se de novo quando a régua é afastada, porque fluidos de sinais contrários atraem-se.

3. Separemos agora a barra de metal em duas partes, depois de removida a régua. Neste caso os dois fluidos não podem misturar-se, de modo que as folhas de ouro retêm o excesso do fluido e conservam-se afastadas.

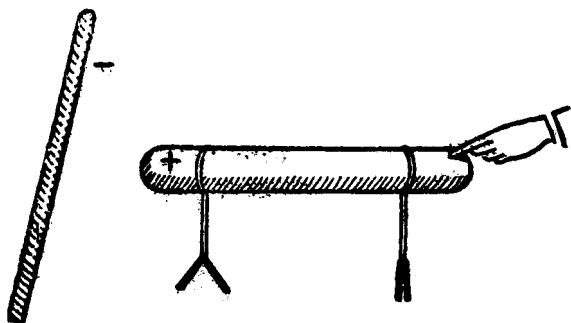
À luz desta simples teoria todos os factos que a experiência revelou se tornam compreensíveis. E a teoria ainda faz mais: habilita-nos a compreender, além destes, muitos outros factos observáveis no reino da «electrostática». O objectivo das teorias é guiar-nos na apreensão de novos factos, sugerindo novas experiências e levando-nos à descoberta de novos fenómenos e novas leis. Um exemplo esclarecerá o assunto. Suponhamos que o experimentador conserva a régua de borracha próximo da barra e ao mesmo tempo a toca com o dedo. Que sucede? A teoria responde: o fluido repelido (—) poderá escapar-se através do corpo do experimentador, de modo que na barra só fique o positivo.

Só as folhas de ouro próximas da régua ficarão afastadas. A experiência confirma esta predição teórica.

A teoria aqui exposta é ingénua, e inadequada, do ponto de vista da moderna física. Não obstante, constitui um exemplo característico do que é uma teoria física.

Não há na ciência teorias eternas. A regra é algum dos factos previstos pela teoria não receber a confirmação da experiência. Cada teoria tem a sua fase de desenvolvimento e triunfo; depois entra em rápido declínio. O surto e a queda da teoria do calor como substância, que já estudámos,

dá disso bom exemplo. Outras mais profundas e importantes serão examinadas no decurso desta obra. Quase todos os grandes avanços na ciência decorrem de uma crise da teoria antiga, e do esforço para resolver as dificuldades criadas. Temos de analisar velhas ideias, velhas teorias, embora sejam coisas já do passado, porque é o único meio de bem compreendermos a importância das novas.

Nas primeiras páginas deste livro comparámos o papel do investigador ao do detective que, depois de reunir certos

elementos, por mera dedução descobre o criminoso. Esta comparação é um simples símile, bastante superficial. O detective tem de estudar cartas, examinar impressões digitais, balas, revólveres, mas já sabe que o crime foi cometido. Com o cientista tudo muda. Não será difícil imaginar alguém que desconheça em absoluto a electricidade, já que os Antigos viveram muito felizes sem nada saberem a tal respeito. Tomemos esse homem e demos-lhe a barra de metal, as folhas de ouro, a régua de borracha, a flanela, a campânula e o mais das nossas experiências. Por mais culto que seja tal homem, não lhe ocorrerá fazer com esses objectos o que o nosso experimentador fez. Encherá a campânula de vinho, por exemplo. Com a régua traçará riscos. No caso do detective o crime existe,

o problema está formulado: quem matou? Mas o cientista, pelo menos em parte, comete o seu próprio crime e ao mesmo tempo leva por diante a investigação. Além disso a sua tarefa não se resume em explicar apenas um caso, mas sim todos os fenómenos que ocorrem, ou possam ocorrer.

Na introdução do conceito dos fluidos, vimos a influência das ideias mecanicistas que procuravam tudo explicar pelo jogo entre as substâncias e as forças que nelas actuam. Para verificar se a concepção mecanicista pode ser aplicada à descrição dos fenómenos eléctricos, temos de levar em conta o seguinte problema. Tomemos duas pequenas esferas, ambas carregadas, isto é, com excesso de um dos fluidos. Sabemos que as esferas se atraem ou repelem. Mas depende essa força da distância? E no caso afirmativo, como? A mais simples suposição parece-nos a de que essa força depende da distância, do mesmo modo que a força da gravidade, a qual diminui, digamos, para um nono do que era se a distância se torna três vezes maior. As experiências realizadas por Coulomb mostraram que esta lei é certa. Cem anos depois de Newton descobrir a lei da gravitação Coulomb verificou uma igual dependência entre a força eléctrica e a distância. Principais diferenças entre a lei de Newton e a de Coulomb: a força de atracção da gravidade está sempre presente, ao passo que a força eléctrica só existe quando os corpos estão carregados. No caso da gravitação só há atracção; no caso eléctrico há também repulsão.

Surge aqui a mesma questão que surge no caso do calor. Serão os fluidos eléctricos uma substância sem peso? Por outras palavras: o peso de um corpo carregado de fluido será o mesmo desse corpo em estado neutro? As nossas balanças não mostram diferença nenhuma — e daí concluímos que os fluidos eléctricos pertencem à família das substâncias sem peso.

Posteriores progressos na teoria da electricidade exigem a introdução de novos conceitos. Temos aqui de evitar defini-

ções rigorosas, usando em vez disto analogia com ideias familiares. Recordemo-nos de como foi essencial para a compreensão do fenómeno do calor a distinção entre calor e temperatura. No caso que nos ocupa temos de distinguir entre o potencial eléctrico e a carga eléctrica. A diferença entre os dois conceitos esclarece-se com esta analogia:

Potencial eléctrico — Temperatura
Carga eléctrica — Calor

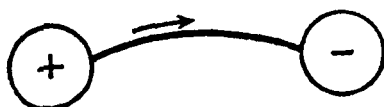
Dois condutores, duas esferas, por exemplo, de tamanhos diversos, podem ter a mesma carga eléctrica, isto é, o mesmo excesso de um dos fluidos, mas nos dois casos o potencial será diferente — será maior para a esfera menor e menor para a esfera maior. O fluido eléctrico terá maior densidade e estará mais comprimido no pequeno condutor. Desde que as forças que repelem crescem com a densidade, a tendência da carga, para escapar do condutor, será maior no caso da esfera menor do que no da maior. Esta tendência serve de medida directa do seu potencial. Para mostrar com clareza a diferença entre carga e potencial formularemos umas tantas sentenças analógicas quanto à conduta do calor e dos condutores carregados.

| *Electricidade* | *Calor* |
|---|---|
| Dois condutores isolados, inicialmente a potenciais eléctricos diferentes, rapidamente adquirem o mesmo potencial, se postos em contacto. | Dois corpos, inicialmente a diferentes temperaturas, ficam à mesma temperatura depois de algum tempo de contacto. |
| Somas iguais de cargas eléctricas produzem diferentes mudanças de potencial eléctrico em dois corpos de capacidade eléctrica diferente. | Iguais quantidades de calor produzem diferentes mudanças de temperatura em dois corpos, se a capacidade de aquecimento destes corpos varia. |

| Um electroscópio em contacto com um condutor indica, pela separação das folhas de ouro, o potencial eléctrico dessas folhas, e, portanto, também o do condutor. | Um termómetro em contacto com um corpo indica, por meio da altura da coluna de mercúrio, a sua própria temperatura e, portanto, também a temperatura do corpo. |
|---|---|

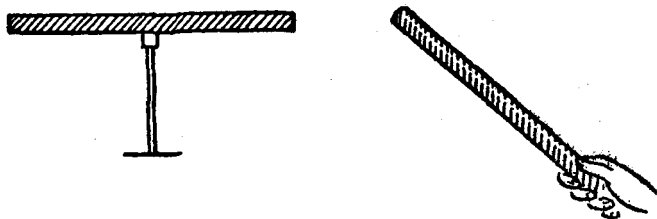
Mas esta analogia não pode ser levada muito mais adiante. Um exemplo mostrará as diferenças e similaridades. Se um corpo quente é posto em contacto com um frio, o calor flui do quente para o frio. Por outro lado suponhamos dois condutores isolados com cargas iguais mas de tipos opostos, um positivo, outro negativo. Os dois revelam potenciais diferentes. Por convenção consideramos o potencial correspondente ao condutor de carga negativa como mais baixo que o potencial correspondente ao de carga positiva. Se os dois condutores são ligados por um fio, segue-se, de acordo com a teoria dos fluidos eléctricos, que não revelarão carga e, portanto, nenhuma diferença no potencial eléctrico. Temos de imaginar um «fluxo» de carga eléctrica de um condutor para outro, durante o curto espaço de tempo em que a diferença de potencial se desfez. Mas como? Foi o fluido positivo que fluiu para o corpo negativo ou vice-versa?

No material até aqui apresentado não temos fundamento para decidir sobre essa alternativa. Podemos admitir uma ou outra possibilidade, ou ainda a de que houve fluxo simultâneo nas duas direcções. Tudo se reduz a adoptar uma convenção, sem nenhuma significação que a justifique, porque não temos métodos para a decisão experimental. Mas desenvolvimentos posteriores, levando a uma teoria muito mais profunda da electricidade, solucionam este problema, que não tem nenhuma explicação na antiga teoria dos fluidos eléctricos. Havemos aqui de adoptar o seguinte modo de expressão. O fluido eléctrico flui do condutor de mais alto potencial para o de mais

baixo. No caso dos nossos dois condutores, a electricidade flui do positivo para o negativo. Esta expressão é convencional e completamente arbitrária. Mas a dificuldade indica que a analogia entre o calor e a electricidade de nenhum modo é perfeita.

Verificámos a possibilidade de adaptar a concepção mecânica à descrição dos factos elementares da electrostática. O mesmo se dará no caso dos fenómenos magnéticos.

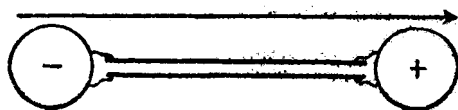
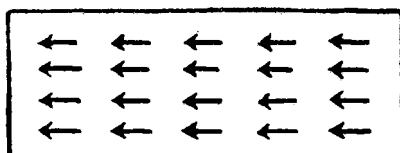
## OS FLUIDOS MAGNÉTICOS

Vamos proceder da mesma maneira que antes, partindo de factos muito simples e procurando depois explicá-los teoricamente.

1. Tomemos duas barras magnéticas, uma suspensa pelo meio, outra mantida na nossa mão. Aproximemos as extremidades dos dois imãs e verifiquemos se se atraem. Se a atracção não se manifesta, temos de virar o imã e experimentar a outra

extremidade. Se as barras estão completamente magnetizadas, qualquer coisa acontece. As extremidades dos imãs são chamados *pólos*. Para prosseguir na experiência, apresentamos o pólo do imã que temos na mão ao imã suspenso pelo meio, e vamos com ele de um extremo ao outro. Verificaremos decréscimo na atracção à medida que nos aproximamos do centro. Se continuarmos a nossa marcha do centro para a outra extremidade, observaremos repulsão, a qual atinge o máximo quando alcançamos o segundo pólo do magneto suspenso.

2. Esta experiência sugere outra. Cada imã tem dois pólos. Poderemos isolar um deles? A ideia que ocorre é muito simples: quebrar o magneto em duas partes. Já vimos que não existe força entre o pólo de um imã e o centro do outro. Mas o resultado da quebra do imã é notável. Cada pedaço comportar-se-á exactamente como se comportou o imã inteiro. A parte do meio, que no imã inteiro não revelava nenhuma força, está agora transformada em pólo!

Como podem ser explicados estes factos? A primeira ideia é ligar a teoria do magnetismo à da electricidade. Essa ideia é-nos sugerida pelo facto de que aqui, como também no fenómeno electrostático, encontramos atracção e repulsão. Imaginemos duas esferas condutoras de igual carga, uma positiva, outra negativa. «Igual» quer dizer do mesmo valor absoluto; + 5 e — 5, por exemplo, têm o mesmo valor absoluto. Admitamos que estas esferas estão ligadas por um isolador de vidro.

Esquematicamente este arranjo pode ser figurado por uma

flecha dirigida do condutor de carga negativa para o de positiva. Chamaremos a esse conjunto *dipolo* eléctrico. É claro que esses dois dipolos comportar-se-ão exactamente como barras magnéticas da experiência n.º 1. Se aceitarmos a nossa invenção como modelo para um imã real, admitindo a existência de fluidos magnéticos, esse imã não passará de um *dipolo magnético*, tendo nas extremidades dois fluidos de diferentes tipos. Esta simples teoria, imitativa da teoria da electricidade, serve para a explicação da primeira experiência. Houve atracção numa das extremidades e repulsão na outra — e um equilíbrio no meio. Mas, quebrado o isolador de vidro que liga as esferas, obteremos dois pólos separados — o que vem contrariar a segunda experiência. Esta contradição força-

-nos a introduzir uma teoria um pouco mais subtil. Temos de imaginar que o imã consiste em pequeninos dipolos magnéticos *elementares*, que não podem ser quebrados em pólos isolados. Reina ordem no imã como um todo, porque todos os dipolos elementares conservam a mesma direcção. Percebemos imediatamente porque a divisão do imã em dois determina a formação de novos pólos nas novas extremidades. E esta teoria mais requintada não só explica os factos da experiência n.º 1 como também os da n.º 2.

Para muitos factos a teoria mais simples dá explicação que dispensa a outra. Vejamos um exemplo. Sabemos que um imã atrai pedaços de ferro. Porquê? Num pedaço de ferro os dois fluidos magnéticos estão misturados, de modo que nenhum efeito se torna aparente. Aproximar desse ferro o pólo

positivo de um imã é dar uma «ordem de divisão» aos fluidos, com atracção do fluido negativo do ferro e repulsão do positivo. Daí a atracção entre o imã e o ferro. Se o imã é afastado, os fluidos retornam mais ou menos à situação em que se achavam, dependendo da intensidade da influência do magnetismo exercido.

Pouco há que dizer quanto ao aspecto quantitativo do problema. Com duas longas barras magnéticas podemos investigar a atracção (ou repulsão) dos seus pólos, quando os aproximamos. O efeito nas outras extremidades das barras é desprezível, se essas barras são bastante longas. De que modo a atracção e a repulsão dependem da distância entre os pólos? A resposta dada pela experiência de Coulomb é que esta dependência da distância é a mesma estabelecida na lei da gravitação e na lei electrostática.

Nesta teoria vemos outra vez a aplicação de um ponto de vista geral: a tendência para descrever todos os fenómenos por meio de forças que atraem ou repelem partículas, unicamente em função da distância.

Um facto muito conhecido deve ser mencionado, em virtude da aplicação que para ele acharemos mais tarde. A Terra é um grande dipolo magnético. Não há o menor traço de explicação disto. O pólo norte é aproximadamente o «menos» (—) e o pólo sul é o «mais» (+) magnético. Os nomes «mais» e «menos» não passam de convenções, mas habilitam-nos a designar pólos em qualquer outro caso. Uma agulha magnética suportada por um eixo vertical obedece ao comando da força magnética da Terra. Essa agulha dirige o seu pólo (+) para o pólo norte, isto é, para o pólo (—) magnético da Terra.

Embora possamos levar a concepção mecânica para o domínio dos fenómenos eléctricos e magnéticos, não há razão para nos orgulharmos e nos agradarmos disso. Alguns aspectos da teoria revelam-se pouco satisfatórios. Novas espécies de substância têm que ser inventadas: dois fluidos eléctricos

e os dipolos magnéticos elementares. A riqueza em substâncias começa a ser esmagadora!

As forças são simples. Expressam-se do mesmo modo que a gravitacional, a eléctrica, ou a magnética. Mas o preço desta simplicidade sobe muito: introdução de novas substâncias sem peso! Isto corresponde a artificialismo bem pouco relacionado com a substância fundamental — massa.

## PRIMEIRA DIFICULDADE SÉRIA

Vamos ver agora a primeira dificuldade séria que surge na aplicação destas teorias. Notaremos adiante como esta dificuldade, juntamente com outras ainda mais graves, determinou a completa derrocada da ideia de que todos os fenómenos podiam ser explicados mecanicamente.

O tremendo surto da electricidade como ramo da ciência e como técnica, começou com a descoberta da corrente eléctrica. Neste ponto encontramos na história da ciência um dos poucos casos em que o acidente representou o papel principal. A história da convulsão das perninhas da rã é contada de muitos modos. Seja qual for a verdade, o certo é que a acidental observação de Galvani levou Volta, no fim do século XVIII, a construir o que chamamos a *pilha voltaica*. Já não está em uso, mas ainda serve nas aulas para demonstração de como se forma a corrente eléctrica.

O princípio da sua construção é simples. Há diversos recipientes de vidro com água e um pouco de ácido sulfúrico. Em cada recipiente colocam-se duas placas de metal, uma de cobre, outra de zinco, imersas na solução. A placa de cobre de um dos recipientes liga-se à placa de zinco do recipiente próximo, de modo que só a placa de zinco do primeiro e a de cobre do último fiquem sem ligação. Por meio do electroscópio podemos verificar a diferença de potencial eléctrico entre

o cobre do primeiro recipiente e o zinco do último, caso a pilha seja suficientemente poderosa.

Foi unicamente com o fim de obter a medição com um aparelho já descrito que introduzimos aqui a pilha voltaica de vários elementos. Para ulteriores demonstrações bastará a de um só elemento. O potencial do cobre torna-se mais alto que o do zinco. «Mais alto» é expressão usada no sentido de que + 2 é maior do que — 2. Se um condutor se liga à placa de cobre e outro à placa de zinco livre, ambos se carregam de fluido, um do positivo, outro do negativo. Até este ponto nada aparece particularmente novo, ou marcante, e podemos tentar a aplicação das nossas ideias sobre as diferenças de potencial. Já vimos que uma diferença de potencial entre dois condutores pode ser instantaneamente anulada pela ligação de um fio, de modo que o fluido passe de um condutor para outro. Este processo equivale ao da igualização da temperatura pelo contacto. Mas será que isto acontece na bateria voltaica? Volta escreveu no seu relatório que as placas se comportavam como condutores

> ... fracamente carregados, que agem incessantemente ou de modo que depois da descarga a carga se restabeleça; que, numa palavra, produzam uma carga ilimitada ou imponham uma perpétua acção ou impulsão do fluido eléctrico.

O extraordinário resultado da sua experiência foi que a diferença de potencial entre as chapas de cobre e zinco não se desvanecia como no caso de dois condutores ligados por um fio. A diferença persistia e de acordo com a teoria dos fluidos tinha de causar um fluxo constante de fluido eléctrico, do nível de potencial mais alto (cobre) para o de mais baixo (zinco). Como tentativa para salvar a teoria do fluxo temos de admitir que alguma força constante actua para restabelecer a diferença de potencial e manter o fluxo. Mas

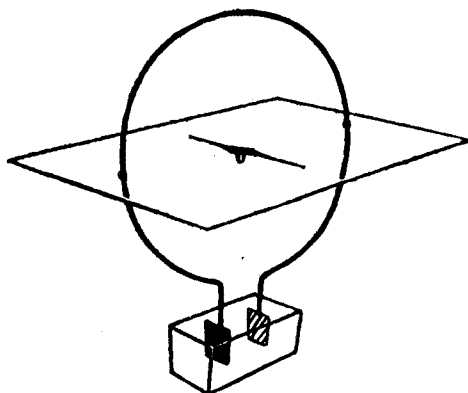
do ponto de vista da energia em si é estranho. Verifica-se que um pouco de calor se gera no fio que conduz a corrente, bastante para fundi-lo, se este for muito fino. Logo, no fio forma-se calor-energia. Mas o todo da pilha voltaica constitui um sistema isolado, que não recebe energia exterior. Se quisermos salvar a lei da conservação da energia, teremos de descobrir onde as transformações se realizam e à custa de que se gera o calor. Não é difícil imaginar que complicados processos químicos se estão realizando na bateria, processos em que tomam parte activa o cobre e o zinco mergulhados na solução. Do ponto de vista da energia isto corresponde a uma cadeia de transformações: energia química → energia do fluido eléctrico que flui, isto é, a corrente → calor. Uma pilha voltaica não dura eternamente: as mudanças químicas associadas ao fluxo da electricidade, depois de algum tempo, tornam-na inerte.

A experiência, entretanto, que realmente revelou as grandes dificuldades da aplicação das ideias mecanicistas deve parecer estranha a quem quer que a realize pela primeira vez. Foi o que há cem anos sucedeu a Oerstad. Diz ele:

Estas experiências mostram que a agulha magnética foi movida da sua posição por meio de um aparelho galvânico, e isto quando o circuito galvânico estava fechado, não quando estava aberto, como anos atrás certos físicos célebres em vão o tentaram.

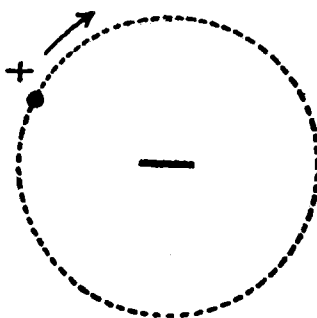
Suponha-se que temos uma pilha voltaica e um fio condutor. Se o fio se liga ao cobre e não ao zinco, existirá a diferença de potencial, mas nenhuma corrente fluirá. Admitamos que o fio se curva em círculo, no centro do qual uma agulha magnética é colocada, ambos, fio e agulha, conservados no mesmo plano. Nada acontece enquanto o fio não toca a chapa de zinco. Não surgem forças actuantes; a diferença de potencial não exerce nenhuma influência na agulha.

Parece difícil de compreender por que motivo «os físicos célebres» de Oerstad esperaram essa influência.

Liguemos agora o fio à chapa de zinco. Imediatamente algo estranho acontece. A agulha magnética sai da sua posição primitiva. Um dos seus pólos aponta para o leitor, se o plano do círculo corresponde ao plano da página em que isto está impresso. O efeito é o de uma força *perpendicular* ao plano, a actuar sobre o pólo magnético. Enfrentados os factos desta

experiência, dificilmente poderemos fugir de tirar uma conclusão sobre a direcção da força actuante.

Esta experiência tem valor, sobretudo porque mostra a relação entre dois fenómenos na aparência diversos: magnetismo e corrente eléctrica. E ainda há mais. A força entre o pólo magnético e a pequena massa do fio através do qual a corrente flui, não pode estar ao longo da direcção que vai do fio à agulha, ou das partículas de fluido eléctrico aos dipolos magnéticos elementares. A força é perpendicular a essa linha! Pela primeira vez aparece aqui uma força completamente diversa daquela a que, na concepção mecânica, queríamos reduzir todas as acções do mundo exterior. Lembremo-nos de que a força da gravitação, a força electrostática e a

magnética obedecem às leis de Newton e Coulomb, agindo ao longo da linha que liga os corpos que se atraem ou se repelem.

A dificuldade ainda foi mais acentuada pela experiência de Rowland feita há oitenta anos. Imagine-se uma pequena esfera carregada de electricidade que se move ao redor de uma

agulha magnética. Em princípio é a mesma experiência de Oersted, com a só diferença de que em vez de uma corrente comum temos uma carga eléctrica em movimento. Rowland verificou que o resultado é similar ao observado quando uma corrente flui num fio circular. O imã é deflectido por uma força perpendicular.

Se aumentamos a velocidade da carga, a força actuante no imã cresce; a deflexão torna-se mais distinta. Esta observação apresenta outra séria complicação. Não só a força deixa de actuar na direcção que vai da carga ao imã, como a intensidade dessa força fica na dependência da velocidade da carga. Toda a arquitectura da concepção mecanicista se baseava na crença de que os fenómenos podiam ser explicados em termos de força e distância, e não de velocidade. O resultado da experiência de Rowland abalou esta interpretação. Vejamos se uma solução é possível sem sairmos das velhas ideias.

Dificuldades desta ordem, súbitos e inesperados tropeços na marcha triunfante de uma teoria, são coisas frequentes na ciência. Às vezes uma simples generalização de velhas ideias parece, pelo menos temporariamente, ser de grande ajuda. Neste caso, por exemplo, poderia ser suficiente alargar o ponto de vista anterior introduzindo mais forças gerais entre as partículas elementares. Frequentemente, entretanto, torna-se impossível remendar uma velha teoria, e as dificuldades que se amontoam acabam por derrubá-la e dar surto a uma nova. No nosso caso não foi apenas o comportamento da pequenina agulha magnética que derrubou a teoria mecanicista. Outro ataque mais violento ela sofreu — mas é história para mais tarde.

## A VELOCIDADE DA LUZ

Nas *Duas Ciências Novas* de Galileu temos o debate entre o mestre e os discípulos a propósito da velocidade da luz.

*SAGREDO:* Mas de que tipo e proporções devo considerar essa velocidade da luz? É instantânea ou, como outros movimentos, requer tempo? Pode o assunto ser resolvido pela experiência?

*SIMPLÍCIO:* A experiência de todos os dias mostra que a luz tem propagação instantânea. Quando vemos o disparo de uma peça de artilharia a grande distância, o clarão chega-nos instantaneamente, e só depois nos chega o som.

*SAGREDO:* Bem, Simplício, a única coisa que posso tirar desse exemplo é que o som caminha menos rapidamente que a luz. Não prova que a luz caminhe instantaneamente, embora prove que é muito rápida...

*SALVIATI:* O óbvio desta e de outras conclusões levaram-me a um método de verificar se a propagação da luz é realmente instantânea...

Salviati explica o seu processo experimental. Para lhe apreendermos a ideia, imaginemos que a velocidade da luz é não só finita, como pequena, e que o movimento da luz é demorado como o da câmara lenta. Dois homens, A e B, munem-se de duas lanternas fechadas e ficam a uma milha de distância um do outro. B combina abrir a sua lanterna no momento exacto em que vir a luz da lanterna de A. Observemos que na nossa «câmara lenta» a luz caminha uma milha por segundo. A dá o sinal, abrindo a lanterna. B vê a luz um segundo depois e abre a sua, dando assim um sinal que A recebe dois segundos depois de ter emitido o seu. Quer dizer que, se a luz viajasse com a velocidade de uma milha por segundo, dois segundos se teriam passado entre o sinal dado por A e o por ele recebido — sendo de uma milha a distância entre os dois. Inversamente, se A não conhecia a velocidade da luz mas admite que o seu companheiro seguiu as instruções combinadas, e observou o sinal por ele dado dois segundos depois do seu, pode concluir que a velocidade da luz é de uma milha por segundo.

Com a técnica experimental daqueles tempos Galileu tinha poucas probabilidades de determinar por esse processo a velocidade da luz. Se a distância fosse de uma milha, ele teria de averiguar intervalos de tempo de um centimilésimo de segundo.

Galileu apenas formulou o problema da determinação da velocidade da luz, não o resolveu. Mas a formulação de um problema é muitas vezes mais importante que a sua solução, a qual constitui apenas matéria de matemática ou de habilidade experimental. Propor novas questões, admitir novas possibilidades, encarar velhos problemas sob novos ângulos, isso requer imaginação criadora e assinala reais avanços na ciência. O princípio da inércia e a lei da conservação da energia subiram unicamente em consequência de pensamentos novos e originais acerca de experiências e fenómenos já bem conhecidos. Muitos exemplos deste tipo serão repassados no

decurso desta obra — exemplos de velhos factos vistos sob nova luz.

Voltando à comparativamente simples questão de determinar a velocidade da luz, cumpre estranhar que Galileu não se apercebesse de que a experiência podia ser muito mais simplesmente feita por um homem só. Em vez de colocar B a distância, A poderia colocar lá um espelho que automaticamente lhe devolvesse o sinal enviado.

Século e meio depois foi este processo empregado por Fizeau, o primeiro físico que determinou a velocidade da luz por meio de uma experiência terrestre. Anteriormente já Roemer o fizera pela observação astronómica, mas com menos rigor.

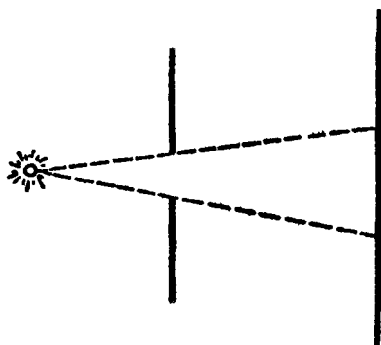
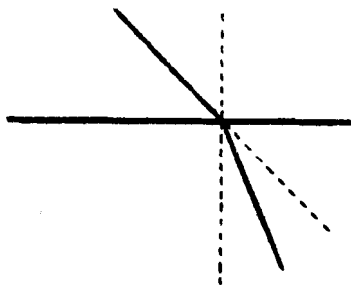
É claro que, em vista da sua grandeza, a velocidade da luz só pode ser medida por meio de distâncias como a da Terra a outro planeta, ou por meio de grande apuramento técnico. Roemer empregou o primeiro método e Fizeau o segundo. A partir daí a medição tem sido refeita com grande precisão. Não há muito que Michelson a repetiu com a máxima perfeição técnica, obtendo os seguintes resultados: a velocidade da luz no vácuo é aproximadamente de cento e oitenta e seis mil milhas por segundo, ou sejam trezentos mil quilómetros por segundo.

## LUZ COMO SUBSTÂNCIA

Vamos de novo tomar como ponto de partida uns tantos factos experimentais. O número acima dado diz respeito à velocidade da luz no vácuo. Sem obstáculos, a luz caminha com essa velocidade no espaço vazio. Podemos ver através de um recipiente de vidro do qual extraímos o ar. Vemos planetas, estrelas e nebulosas, embora a luz venha ter aos nossos olhos depois de atravessar imensos espaços vazios. O simples facto de podermos ver através de um recipiente no qual fize-

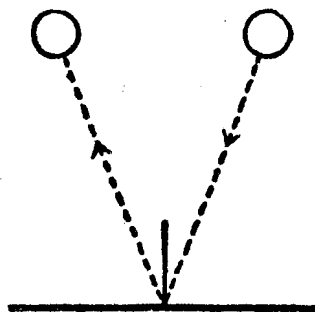
mos o vácuo mostra que a presença do ar pouco importa à luz. Por esse motivo realizamos experiências ópticas numa sala comum, com os mesmos resultados que obteríamos se as fizéssemos no vácuo.

Um dos factos ópticos mais simples é a propagação rectilínea da luz. Vamos descrever a primitiva e ingénua expe-

riência que o prova. Fronteiro a um ponto-fonte, colocamos um *écran* com um furo. O ponto-fonte é uma pequena fonte de luz, como um buraquinho de uma lanterna fechada. Numa parede distante o furo no *écran* será representado como luz num fundo escuro. O desenho acima mostra como isto se liga

à propagação rectilínea da luz. Todos estes fenómenos, e ainda outros mais complicados, em que luz, sombra e penumbra aparecem, podem ser explicados com a admissão de que a luz, no vácuo ou no ar, se propaga em linha recta.

Tomemos outro exemplo, um caso em que a luz atravessa a matéria. Temos aqui um raio de luz passando pelo vácuo e incidindo numa lâmina de vidro.

Que acontece? Se a lei do movimento rectilíneo ainda é válida, a trajectória será a mostrada pela linha pontuada. Mas na realidade não é assim. Ocorre uma mudança de direc-

ção, como se vê no desenho. A este fenómeno chamamos *refracção*. Todos nos recordamos da experiência da vara mergulhada na água, que parece torta, uma das muitas manifestações de refracção.

Bastam estes factos para indicar como pode ser arquitectada uma teoria mecânica da luz. O nosso objectivo presente é mostrar como as ideias de substâncias, partículas e forças penetram o campo da óptica, e como, afinal, a velha concepção filosófica desmoronou. É da mais primitiva forma a teoria que decorre destes factos. Temos de supor que todos os corpos luminosos emitem partículas de luz, ou *corpúsculos*, os quais, atingindo os nossos olhos, nos dão a sensação da luz. Já estamos acostumados, quando as contingências da

teoria mecânica o pedem, a admitir novas substâncias, de modo que sem nenhuma hesitação podemos mais uma vez usar deste recurso. Esses corpúsculos viajam em linha recta através do espaço vazio com velocidade conhecida, trazendo-nos mensagens dos corpos emissores de luz. Todos os fenómenos que exibem a propagação rectilínea da luz sustentam a teoria corpuscular, porque foi justamente esse tipo de movimento o prescrito para os corpúsculos. Também com muita simplicidade a teoria explana a reflexão da luz pelos espelhos — um tipo de reflexão como o das bolas elásticas arremessadas contra uma parede.

A explicação da refracção já é um pouco mais difícil. Sem entrar em detalhes, podemos admitir a possibilidade de uma explicação mecânica. Se, por exemplo, os corpúsculos caem na superfície do vidro, pode ser que as partículas da matéria exerçam uma força sobre eles, força que de um modo muito estranho só age na imediata vizinhança da matéria. Qualquer força actuante numa partícula em movimento muda-lhe a velocidade, como já vimos. Se a força exercida sobre os corpúsculos de luz é uma atracção perpendicular à superfície do vidro, o novo movimento estará em qualquer parte entre a direcção da trajectória original e a perpendicular. Para a teoria corpuscular da luz esta explicação parece prometer muita coisa. A fim de apurar a sua validez, entretanto, temos de investigar novos factos, mais complicados.

## O ENIGMA DA COR

Foi ainda o génio de Newton que explicou pela primeira vez a riqueza cromática do mundo. Eis a sua descrição de uma das experiências:

No ano de 1666 (tempo em que me aplicava ao polimento de lentes ópticas não esféricas) preparei um prisma para

estudar o famoso fenómeno das cores. E com esse fim transformei o meu quarto em câmara escura, com um furo na janela, para só entrar uma quantidade conveniente de luz, nele colocando o prisma; a luz refractada ia bater na parede oposta. Foi a princípio um agradável divertimento ver desdobrar-se a luz em vivas e intensas cores.

A luz do sol é «branca». Coada através do prisma, mostra todas as cores existentes no mundo visível. Nas belas faixas do arco-íris a Natureza reproduz o fenómeno. As tentativas para explicá-lo são muito velhas. A história bíblica conta que o arco-íris é a assinatura de Deus numa convenção feita com os homens; é, em certo sentido, uma «teoria» — mas que não explana de modo satisfatório a razão do arco-íris se repetir tanto e andar sempre ligado à chuva. Na grande obra de Newton é que pela primeira vez o enigma da cor foi cientificamente atacado.

Uma orla do arco-íris é sempre vermelha e a outra, violeta. Entre ambas as mais cores se dispõem. Eis a explicação que Newton deu ao fenómeno: todas as cores estão presentes na luz branca. Atravessando o espaço interplanetário e a atmosfera, causam-nos o efeito da luz branca. A luz branca é, por assim dizer, uma mistura de corpúsculos de diferentes tipos, pertencentes às diversas cores. No caso da experiência de Newton o prisma separa-as no espaço, e a refracção é devida, de acordo com a teoria mecanicista, a forças que se originam nas partículas do vidro e actuam nas partículas de luz. Estas forças são diferentes para corpúsculos pertencentes a esta ou àquela cor, sendo mais fortes para o violeta e mais fracas para o vermelho. Cada cor, portanto, refracta-se num curso diferente, separando-se das demais quando a luz atravessa o prisma. No caso do arco-íris as gotas de água fazem o papel do prisma.

A teoria da luz como substância fica então mais compli-

cada. Não temos uma substância única para a luz, mas muitas, uma para cada cor. Porque se há alguma verdade nesta teoria as suas consequências devem estar de acordo com a observação.

As cores que a experiência de Newton revelou na luz do sol recebem o nome de *espectro* do Sol, ou, mais precisamente, *espectro visível*. A decomposição da luz branca nas suas componentes recebe o nome de *dispersão* da luz. As cores do espectro podem ser novamente unificadas por um segundo prisma — a menos que seja errónea a explicação. O processo será uma reversão do primeiro — obteremos luz branca com a fusão das cores separadas. Newton mostrou experimentalmente que por esse simples processo é possível obter luz branca. Essas experiências constituíram um forte esteio da teoria pela qual os corpúsculos pertencentes a cada cor se comportam como substâncias imutáveis. Diz Newton:

... tais cores não são geradas: tornam-se aparentes pela separação; porque, se novamente misturadas, novamente comporão a cor que tínhamos antes da separação. E pelo mesmo motivo transmutações feitas com a fusão de diversas cores não são reais; porque, quando os raios são de novo desdobrados, exibem as mesmas cores que tinham antes da composição; quando finalmente misturados o pó azul e o amarelo, aparece aos nossos olhos o verde, mas as cores dos corpúsculos componentes não se acham transmutadas, mas apenas misturadas. Vistas ao microscópio, os corpúsculos aparecem misturadamente azuis e amarelos.

Suponha-se que isolámos uma estreita faixa do espectro. Isto significa que de todas as cores só deixamos que uma passe pela abertura feita no *écran*. O raio que a atravessa é composto de luz *homogénea*, isto é, luz que não pode ser

desdobrada em componentes. Isto é uma consequência da teoria, facilmente confirmável pela experiência. De nenhum modo tal raio de uma só cor pode ser dividido. Há meios muito simples de obtermos luz homogénea. O sódio, por exemplo, emite luz homogénea amarela quando incandescente.

Imaginemos que de súbito uma estranha coisa sucede: o Sol começa a emitir luz homogénea de certa cor, digamos amarela. A grande variedade de cores que existe no mundo imediatamente desaparecerá. Tudo amarelo ou negro! Esta predição é consequência da teoria da luz como substância, porque novas cores não podem ser criadas. A sua validade recebe a confirmação da experiência: num recinto cuja única fonte luminosa é o sódio incandescente, tudo fica amarelo ou negro. A riqueza de cor do mundo reflecte a variedade de cores de que a luz branca se compõe.

A teoria da luz como substância parece em todos estes casos justificar-se de modo esplêndido, apesar da necessidade da introdução de tantas substâncias quantas as cores — o que torna a teoria um pouco incómoda. A suposição de que todos os corpúsculos da luz têm exactamente a mesma velocidade no espaço, parece muito artificial.

Podemos imaginar que outro conjunto de suposições de carácter bem diverso igualmente se justifique e tudo explique. E, de facto, em breve assistiremos ao surto de outra teoria baseada em conceitos diferentes, mas também explicativos dos fenómenos ópticos. Antes do estudo dessa nova teoria, entretanto, teremos de responder a uma questão de nenhum modo ligada a considerações ópticas. Retornemos à mecânica e perguntemos:

## QUE É UMA ONDA?

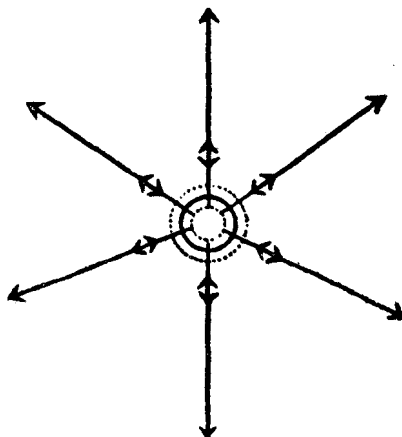
Um boato nasce em Washington e rapidamente chega a Nova Iorque, ainda que nenhuma das pessoas que tomam parte na sua disseminação viaje da primeira cidade à segunda.

Vemos aqui dois movimentos diversos: o movimento do boato de Washington a Nova Iorque e o das pessoas que o espalham. O vento que passa sobre um campo de trigo forma uma onda que percorre todo o trigal. Também aqui distinguimos entre o movimento da onda e o movimento das plantas sujeitas a leves oscilações. Todos temos visto as ondas em círculos concêntricos que uma pedra atirada à água forma. O movimento dessas ondas é muito diferente do movimento das partículas da água. As partículas apenas sobem e descem. O movimento observado na onda é movimento *na* matéria, não *da* própria matéria. A cortiça a flutuar sobre a onda mostra-o claramente, porque se move para cima e para baixo de acordo com o movimento da água, em vez de ser levada para longe pela onda.

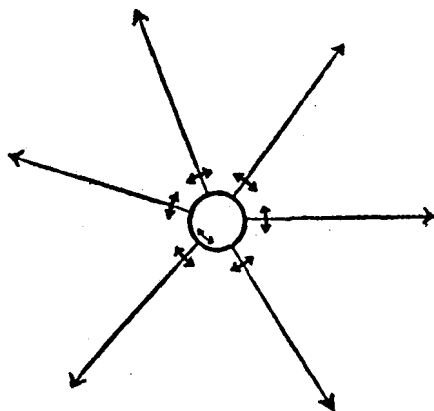
Para melhor compreendermos o mecanismo da onda vamos figurar uma experiência ideal. Suponhamos um grande espaço uniformemente cheio de água, ar ou qualquer outro «meio». Em qualquer parte, no centro desse espaço, está uma esfera. No começo não há movimento nenhum; súbito, a esfera começa a «respirar» ritmicamente, com expansão e contracção do seu volume, embora sem perda da forma esférica. Que acontece nesse «meio?» Comecemos o nosso exame no momento em que a esfera principia a expandir-se. As partículas do «meio» em imediata vizinhança com a esfera são impelidas, de modo que uma camada esférica de água ou ar, ou do que venha a compor esse meio, se adensa. Do mesmo modo, quando a esfera se contrai a densidade da parte do meio que a rodeia decresce. Estas mudanças de densidade propagam-se por todo o meio. As partículas que o constituem apenas realizam pequenas vibrações, mas o movimento total é o de uma onda progressiva. A coisa essencialmente nova é que pela primeira vez consideramos o movimento de algo que não é matéria, mas sim energia propagada através da matéria.

Por meio do exemplo da esfera que respira, podemos introduzir dois conceitos físicos gerais, importantes na caracte-

rização das ondas. O primeiro é a velocidade com que elas se propagam, o que depende do meio, variando se for água ou ar. O segundo conceito é o de *comprimento da onda*. No caso das ondas do mar, ou de um rio, esse comprimento é a distância entre o fundo de uma onda e o da imediata, ou entre a crista de uma e a crista da próxima. Assim, o mar tem ondas de maior comprimento que as dos rios. No nosso caso das ondas criadas pelo pulsar da esfera, o comprimento de onda é a dis-

tância, num dado tempo, entre dois adensamentos esféricos vizinhos. É evidente que esta distância não depende apenas do meio. A frequência de pulsação da esfera certamente que exercerá efeito, tornando o comprimento da onda mais curto, se a pulsação é mais rápida, ou mais comprido, se é mais lenta.

Este conceito de onda trouxe muitos resultados para a física. É nitidamente um conceito mecânico. O fenómeno reduz-se a movimentos das partículas que, de acordo com a teoria cinética, constituem a matéria. Assim, cada teoria que

empregue o conceito de onda pode, em geral, ser tida como mecanicista. A explicação dos fenómenos acústicos, por exemplo, é essencialmente baseada no conceito de onda. Corpos em vibração, como as cordas vocais ou as de um violino, são fontes de ondas sonoras que se propagam no ar, no modo descrito na experiência da esfera pulsante. O conceito de onda permite-nos reduzir ao mecanicismo todos os fenómenos acústicos.

Já notámos que há que distinguir entre o movimento das partículas e o da onda em si, a qual constitui um estado do

meio. Os dois movimentos são muito diversos, mas torna-se patente que, no caso da esfera pulsante, os dois movimentos se realizam na mesma linha recta.

As partículas do meio oscilam ao longo de curtos segmentos de recta, e a densidade cresce e decresce periodicamente, de acordo com esse movimento. A direcção na qual a onda se propaga coincide com a linha em que as oscilações se mantêm. Este tipo de onda é chamado *longitudinal*. Mas teremos

só este tipo de onda? Para fins futuros, havemos que imaginar a possibilidade de outro tipo, o *transversal.*

Modifiquemos o nosso caso da esfera pulsante. Está ela agora mergulhada num meio diferente, uma espécie de geleia, em vez de água ou ar. Além disso, em vez de pulsar, a esfera faz pequenos movimentos de rotação de ida e vinda, sempre com o mesmo ritmo e sempre em torno de um eixo definido.

A geleia adere à esfera, e a parte da geleia aderente vê-se forçada a acompanhar os movimentos da esfera. Essa parte da geleia força as que lhe estão chegadas a fazerem o mesmo, e assim por diante, de modo que uma onda se forma em todo o meio gelatinoso. Se tivermos em mente a distinção entre o movimento do meio e o da onda, veremos que não se fazem na mesma linha. A onda propaga-se na direcção do raio da esfera, enquanto as partes do meio se movem perpendicularmente a essa direcção. Desse modo criámos uma onda transversal.

As ondas que se propagam na superfície do oceano são transversais. Uma rolha flutuante apenas sobe e desce; mas a onda segue num plano horizontal. As ondas sonoras fornecem-nos o mais simples exemplo das ondas longitudinais.

Uma observação ainda: a onda produzida por uma esfera pulsante ou oscilante dentro de um meio homogéneo é uma onda *esférica*. Denominámo-la assim, porque, num dado momento, todos os pontos do meio que rodeia a esfera-fonte se comportam da mesma maneira. Tomemos uma porção do meio, a grande distância da fonte. Quanto mais longe da fonte e menor for a porção, mais esta se assemelha a um plano. Podemos dizer, embora sem grande rigor, que não há diferença essencial entre a superfície de um plano e a superfície de uma pequena parte de uma esfera de raio suficientemente grande. Frequentemente falamos de pequenas porções de uma onda esférica muito afastada, como de *ondas planas*. Quanto mais recuadamente figuramos a parte sombreada da figura abaixo,

ou mais longe ela estiver do centro da esfera, e menor for o ângulo entre os dois raios A e B, melhor a nossa representação se aproximará da onda plana.

O conceito de onda plana, como muitos outros conceitos da física, não passa de ficção, mas é conceito valioso, de que necessitaremos mais tarde.

## A TEORIA ONDULATÓRIA DA LUZ

Expliquemos o motivo que nos levou a interromper a descrição do fenómeno óptico. O nosso intento era introduzir uma teoria da luz, diferente da corpuscular. Para tanto, houve necessidade de interromper a exposição a fim de introduzir o conceito de onda. Voltamos agora ao ponto em que estávamos.

Foi Huygens, um contemporâneo de Newton, quem apresentou essa nova teoria. No seu tratado sobre a luz diz ele:

Se, além disso, a luz leva tempo a caminhar — o que iremos ver — segue-se que o movimento impresso à matéria é sucessivo; e consequentemente espalha-se, como faz o som, em

superfícies esféricas e ondas; digo ondas por causa da semelhança que têm com as formadas na água quando nela atiramos um seixo; essa onda apresenta um sucessivo desdobrar-se em círculos, embora tenha causa diversa, e revela-se unicamente na superfície.

De acordo com Huygens, a luz é uma onda, uma transferência de energia, não de substância. Já vimos que a teoria corpuscular explica muitos dos factos observados. Fará o mesmo esta teoria ondulatória? Temos de novamente propor questões que já foram respondidas pela teoria corpuscular para ver se também assim recebem boas soluções. Façamo-lo sob forma de diálogo entre N e H. N, defensor da teoria corpuscular de Newton, e H, defensor da teoria de Huygens. Nenhum dos dois utilizará argumentos desenvolvidos depois dos trabalhos desses dois grandes mestres.

N: Na teoria corpuscular a velocidade da luz tem significação muito definida. Quer dizer a velocidade com que os corpúsculos viajam através do espaço vazio. Que significa a velocidade na teoria ondulatória?

H: Significa a velocidade de uma onda de luz, é claro. Cada onda que conhecemos propaga-se com velocidade definida — e o mesmo se dá com a onda de luz.

N: Não me parece simples. As ondas sonoras propagam-se no ar; as marinhas, no mar. Cada onda deve ter um meio material em que caminhe. Mas a luz atravessa o vácuo, que o som não atravessa. Admitir uma onda num espaço vazio, equivale a não admitir onda nenhuma.

H: Sim, está aí uma dificuldade que não me é nova. O meu mestre Huygens ponderou muito cuidadosamente esse ponto, e declara que o único meio de resolver a questão é admitir a existência de uma substância hipotética, o *éter*, meio transparente que permeia todo o Universo. O Universo está por

assim dizer imerso no éter. Se tivermos a coragem de introduzir este conceito, tudo mais se tornará claro e convincente.

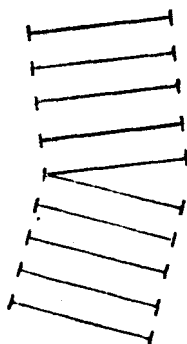
N: Mas eu objecto contra essa admissão. Em primeiro lugar, trata-se da introdução de uma nova substância hipotética — e já temos muitas na física. Mas há mais. O amigo admite, sem dúvida, que podemos explicar todos os fenómenos mecanicamente. Mas como explicar mecanicamente o éter? Poderá explicar-me como o éter é constituído e como se revela em outros fenómenos?

H: A sua primeira objecção justifica-se. Mas, pela introdução artificial desse éter sem peso, imediatamente nos libertamos da hipótese muito mais artificial dos corpúsculos de luz. Teremos apenas uma «misteriosa» substância, em vez de um número infinito correspondente à grande quantidade de cores do espectro. Não acha que é progredir? Pelo menos as dificuldades ficam todas concentradas num só ponto. Não teremos necessidade de admitir que partículas pertencentes a esta ou àquela cor transitam com a mesma velocidade no espaço. O seu argumento número dois também é procedente. Não podemos dar uma explicação mecânica do éter. Mas quem sabe se os futuros desenvolvimentos da óptica, ou de outros fenómenos, nos não revelarão a sua estrutura? De momento temos de aguardar novas experiências e conclusões; mas espero que ao fim possamos resolver o problema da estrutura mecânica do éter.

N: Abandonemos momentaneamente a questão, uma vez que não pode ser resolvida. Eu gostaria de ver como a sua teoria, mesmo depois do advento dessa possível solução futura, explica os fenómenos que a teoria corpuscular torna tão claros e compreensíveis. Tome por exemplo o facto de a luz caminhar no vácuo ou no ar em linha recta. Um pedaço de papel colocado defronte de uma vela produz uma sombra nítida na parede. Sombra assim nitidamente definida não seria possível se a teoria ondulatória fosse exacta, porque as ondas encurvar-se-iam nos bordos do papel e desse modo diluiriam os bordos

da sombra. Um pequeno navio não constitui obstáculo para as ondas do oceano, bem sabe; as ondas curvam-se em redor dele sem projectar sombra.

H: Esse argumento não é procedente. Tome, num rio, ondas curtas que batam nos costados de um grande navio. As ondas que se formam de um lado não serão vistas do outro lado. Se as ondas são suficientemente pequenas e o navio é bastante grande, uma sombra perfeitamente distinta aparecerá. É muito provável que a luz dê a impressão de caminhar em linha recta, unicamente porque o comprimento das ondas é muito pequeno em comparação com o tamanho dos obstá-

culos e orifícios usados nas experiências. Talvez que se pudéssemos criar uma obstrução adequadamente mínima nenhuma sombra ocorresse. Temos grande dificuldade em construir um aparelho de experiência capaz de mostrar que a luz se curva. Não obstante, se uma tal experiência fosse realizável, seria decisiva na demonstração do valor de uma ou de outra teoria da luz.

N: A teoria ondulatória pode, no futuro, levar-nos a novos factos, mas não vejo dados experimentais que a sustentem.

E até que a experiência prove a curvabilidade da luz, não encontro razão para o abandono da teoria corpuscular — que me parece mais simples e por isso melhor que a ondulatória.

Podemos interromper aqui o debate, embora a matéria não esteja esgotada.

Resta mostrar como a teoria ondulatória explica a refracção da luz e a variedade das cores, fenómenos que a teoria corpuscular explicou. Vamos começar com a refracção, tomando, por comodidade, um fenómeno que nada tem que ver com a óptica.

Figuremos um espaço aberto onde caminham dois homens segurando pelas pontas uma vara rígida. Começam a caminhar para a frente, em recta, com a mesma velocidade. Enquanto a velocidade com que caminham permanece a mesma, a vara sofrerá um deslocamento paralelo, isto é, não mudará de direcção. Todas as sucessivas posições da vara serão paralelas às anteriores. Imaginemos agora que, por uma fracção de segundo, os movimentos dos dois homens não são os mesmos. Que acontece? Claro que, durante esse breve momento, a vara mudará de posição, perdendo o paralelismo em que vinha. Quando a velocidade dos dois homens se igualar de novo, a direcção da vara em movimento já não será a mesma. O desenho anterior mostra-o claramente.

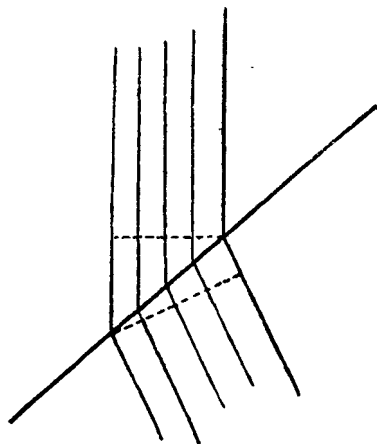
A mudança de direcção deu-se durante o intervalo de tempo em que a velocidade dos dois homens variou.

Este exemplo habilita-nos a compreender a refracção da onda. Uma onda plana em marcha através do éter toca uma lâmina de vidro. No desenho seguinte vemos uma onda que apresenta uma frente comparativamente ampla. Essa frente é um plano no qual, num dado momento, todas as partes do éter se comportam do mesmo modo. Desde que a velocidade depende do meio através do qual a luz vai passando, ela será diferente na lâmina de vidro — diferente da que a luz possuía

no espaço vazio. No curto espaço de tempo em que a frente das ondas imerge no vidro, diferentes partes desta frente terão diferentes velocidades. Torna-se claro que a parte da onda de luz que alcançou o vidro caminhará com a «velocidade da luz dentro de vidro», enquanto as outras partes ainda caminham com a velocidade da luz no éter. Por causa desta diferença de velocidade na frente das ondas durante o tempo de imersão na massa do vidro, a direcção da onda muda.

Vemos, pois, que tanto uma teoria como outra explicam a refracção. Mas considerações posteriores, com um pouco de matemática, mostram que a teoria ondulatória explica-a mais simplesmente e melhor, e que as suas consequências estão em perfeito acordo com a observação. Realmente, os métodos quantitativos habilitam-nos a deduzir a velocidade da luz num meio refractante, se sabemos como o raio que o atravessa se refracta. Medidas directas confirmam esplendidamente estas predições — e portanto também confirmam a teoria ondulatória.

Resta ainda à questão da cor.

Cumpre recordar que uma onda se caracteriza por dois números — o da sua velocidade e o do seu comprimento.

A suposição essencial na teoria ondulatória é de que *os diferentes comprimentos de ondas correspondem às diferentes cores.* O comprimento das ondas da luz amarela homogénea difere do da luz vermelha ou violeta. Em vez da artificial segregação de corpúsculos pertencentes a várias cores, temos a natural diferença dos comprimentos de onda.

Segue-se que a experiência de Newton sobre a dispersão da luz pode ser descrita em duas linguagens diversas — a corpuscular e a ondulatória. Exemplo:

*Linguagem Ondulatória*

Os raios de diferentes comprimentos de onda, pertencentes a diferentes cores, têm a mesma velocidade no éter, mas têm diferentes velocidades no vidro.

A luz branca é uma composição de ondas de todos os comprimentos, como as vemos separadas no espectro.

*Linguagem Corpuscular*

Os corpúsculos pertencentes a diferentes cores têm a mesma velocidade no vácuo, mas têm velocidades diferentes no vidro.

A luz branca é uma composição de corpúsculos pertencentes a diferentes cores, como as vemos separadas no espectro.

Para evitar a ambiguidade resultante da existência de duas teorias distintas, será prudente decidir a favor de uma ou outra, depois de cuidadosa consideração dos méritos recíprocos. O diálogo entre N e H mostra que não é fácil a tarefa. A decisão neste ponto provirá antes do gosto pessoal do que da convicção científica. No tempo de Newton, e por mais de um século ainda, a maioria dos físicos propendeu para a teoria corpuscular.

Em tempo muito mais recente, a história deu o seu veredicto a favor da teoria ondulatória — lá por meados do século XIX. No debate com H, opinou N que a demonstração experimental das duas teorias não era coisa provável. A teoria corpuscular, não admitindo que a luz se encurvasse, impunha a existência de sombras nítidas. E na teoria ondulatória um obstáculo extremamente mínimo não daria sombra. Nos trabalhos de Young e Fresnel, este resultado foi experimentalmente realizado, confirmando estas conclusões teóricas.

Uma experiência muito simples já havia sido debatida, na qual um *écran* com um furo era colocado diante da fonte de luz, produzindo sombra na parede fronteira. Essa experiência foi depois simplificada pela admissão da luz homogénea como foco. Imaginemos que o furo no *écran* vai diminuindo de diâmetro. Se recorrermos a uma forte fonte luminosa e o furo for suficientemente reduzido, novo e surpreendente fenómeno ocorrerá, de todo incompreensível do ponto de vista da teoria dos corpúsculos. Desaparece a clara distinção entre luz e sombra. A luz esmaece gradualmente numa série de anéis luminosos e escuros. O aparecimento de anéis é característico da teoria das ondas. A explicação desse alternamento de anéis escuros e luminosos é dada por outra experiência. Suponhamos uma folha de papel negro com dois furos de alfinete pelos quais a luz passe. Se os furos estão bem próximos e a fonte de luz homogénea é bastante forte, muitas listas aparecerão na parede, que se vão gradativamente esmaecendo. A explicação é simples. Uma lista escura está onde um fundo da onda vinda por um dos furos encontra a crista de outra onda vinda pelo outro furo, de modo que ambas se anulam. Uma lista de luz está onde dois fundos de onda, ou duas cristas de onda, vindas dos dois furos, se encontram e se reforçam. A explicação é mais complexa no caso dos anéis escuros e luminosos do exemplo anterior. Temos de conservar em mente os dois fenómenos para os retomarmos mais tarde. Estas experiências mostram a *difracção* da luz,

ou seja o desvio da propagação rectilínea, quando pequenos furos ou obstáculos se apresentam no caminho da onda.

Com a ajuda de um pouco de matemática podemos dar mais um passo em frente. É possível verificarmos quão grande, ou melhor, quão pequeno, deve ser o comprimento da onda que produz estes desenhos. Desse modo a experiência descrita habilita-nos a medir o comprimento de onda de uma luz homogénea. Para dar ideia de quão pequenos são os números obtidos, basta citar dois comprimentos de onda — o do vermelho e o do violeta, extremos do espectro solar.

| | |
|---|---|
| O comprimento de onda da luz vermelha é de | 0.00008 cm |
| E o da luz violeta é de ................................ | 0.00004 cm |

Não nos admiremos de que sejam tão minúsculos esses números. O fenómeno da sombra distinta, isto é, o fenómeno da propagação rectilínea da luz, é observado na Natureza unicamente porque os furos e obstáculos que a experiência consegue são extremamente grandes comparativamente aos comprimentos de onda da luz. Só quando obtemos furos e obstáculos ultramínimos é que a luz revela a sua natureza ondulatória.

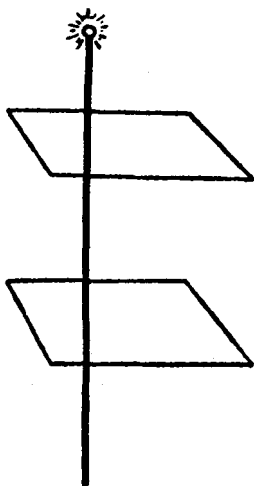
Mas a história da investigação da luz não está ainda terminada. O veredicto do século XIX não foi sentença final. Para os físicos modernos o dilema da decisão entre corpúsculos e ondas está de pé, mas sob aspecto muito mais complicado. Admitamos a derrota da teoria corpuscular, mas reconhecendo apenas o problemático êxito da teoria ondulatória.

## ONDAS LUMINOSAS LONGITUDINAIS OU TRANSVERSAIS

Todos os fenómenos ópticos que estudámos falam em prol da teoria ondulatória. A curvatura da luz em redor de pequenos obstáculos e a explicação da refracção constituem fortes argumentos. Mas, guiados pelos conceitos mecânicos, compreendemos que há ainda uma questão a ser ventilada: a determinação das propriedades mecânicas do éter. Essencial para a solução deste problema é saber se são longitudinais ou transversais as ondas da luz no éter. Por outras palavras: propagar-se-ão como o som? Será a onda de luz devida a mudanças de densidade do «meio», de modo que as oscilações das partículas tenham a direcção da propagação? Ou assemelha-se o éter a uma geleia elástica, «meio» no qual só ondas transversais se formam e onde as partículas se movem em direcção perpendicular à da onda?

Antes de resolver este problema, procuremos decidir qual das respostas será a preferível. Obviamente, seria bom que as ondas pertencessem ao tipo longitudinal, porque isso viria simplificar a compreensão mecânica do éter. A nossa figuração do éter poderia aproximar-se da forma de um gás, como o que explica a propagação das ondas sonoras. Seriam muito maiores as dificuldades se o éter tivesse de carregar ondas transversais. Não é fácil conceber o éter como geleia. Huygens propôs um éter-aéreo, não um éter-geleia. A Natureza cura muito pouco das nossas limitações. Mas teria sido ela, neste caso, generosa para com os físicos que tentam compreender todos os fenómenos como mecânicos? Antes de darmos a resposta, cumpre-nos discutir novas experiências.

Detalharemos unicamente uma. Suponhamos lâminas de turmalina com espessura que nos permita ver a luz através delas. Tomemos duas dessas lâminas e coloquemo-las entre os nossos olhos e a luz. Que veremos? Se as lâminas forem sufi-

cientemente finas, veremos o ponto luminoso. As probabilidades são muitas de que a experiência confirme essa expectativa. Sem nos preocuparmos de que se trata aqui apenas de uma probabilidade, admitamos que vemos a luz através das duas lâminas. Mudemos agora gradualmente a posição de uma delas, girando-as em torno de um eixo fixo, que será a linha determinada pelo raio luminoso. Isto significa a deslocação de todos os pontos de uma das lâminas, excepto os do eixo. Uma coisa estranha acontecerá. A luz tornar-se-á mais fraca, até se

desvanecer completamente. Mas reaparecerá, se a rotação prossegue — e voltamos à posição do início.

Sem entrarmos nos detalhes desta e de semelhantes experiências, proporemos a seguinte pergunta: poderão ser explicados estes fenómenos, se as ondas de luz forem longitudinais? No caso da onda longitudinal as partículas do éter mover-se-iam ao longo do eixo, como se move o raio luminoso. Quando a lâmina se move, nada ao longo do eixo muda. Os pontos do eixo não se movem, sofrem apenas leve deslocação.

Nenhuma mudança distinta, como o esmaecimento ou a reaparição pode ocorrer com a onda longitudinal. Isto e muitos outros fenómenos similares esclarecem-se unicamente pela admissão de que a onda de luz é transversal, não longitudinal! Ou, por outras palavras, de que o éter tem o carácter da geleia.

É desolador! As dificuldades para explicar mecanicamente o éter recrescem...

## O ÉTER E A TEORIA MECANICISTA

A discussão das várias tentativas para compreender a natureza mecânica do éter como meio de transmissão da luz levar-nos-ia muito longe. Uma construção mecânica significa, como sabemos, que a substância é formada por moléculas com forças a actuarem ao longo de linhas que as ligam, forças só dependentes da distância. A admissão do éter como substância dotada do carácter mecânico da geleia, seria altamente artificial e antinatural. Não a estudaremos aqui; pertence a um passado já morto. O carácter artificial de todas estas suposições e a necessidade de introduzir tantos elementos novos completamente desligados uns dos outros foram o bastante para destruir a fé na velha teoria mecanicista.

Outras dificuldades há ainda com o éter. O éter deve existir por toda a parte, caso queiramos explicar mecanicamente os fenómenos ópticos. Se a luz caminha só através de um meio, não há espaços vazios.

Sabemos, entretanto, que os espaços interestelares não oferecem resistência ao movimento dos corpos materiais. Os planetas, por exemplo, viajam através do éter-geleia sem encontrar qualquer resistência, como a que lhes oporia ao movimento um meio material. Se o éter não perturba os movimentos da matéria, não pode haver interacção entre as partículas do éter e as da matéria. A luz atravessa o éter e também a massa do vidro, mas a sua velocidade muda no vidro. Como

explicar mecanicamente este facto? Aparentemente, só admitindo alguma interacção entre as partículas do éter e as da matéria. Já vimos que, no caso dos corpos que se movem livremente, tais interacções são tidas como inexistentes. Por outras palavras, há interacção entre o éter e a matéria no caso dos fenómenos ópticos — mas nenhuma no caso dos fenómenos mecânicos! Conclusão evidentemente paradoxal.

Na tentativa de compreender os fenómenos da Natureza, no decorrer do século XX, tornou-se necessário introduzir artificialmente substâncias tais como os fluidos eléctricos, os corpúsculos de luz e o éter. O resultado foi simplesmente a concentração de todas as dificuldades em uns tantos pontos básicos — como no éter, no caso dos fenómenos ópticos. Todas as tentativas para construir um éter indicam que a verdadeira dificuldade reside na ideia de explicar todos os fenómenos da Natureza pela teoria mecanicista. Mas a ciência vai perdendo a velha convicção no programa mecânico; nenhum físico de hoje crê nas suas possibilidades de vitória.

Nesta rápida inspecção das principais ideias da física, topámos com vários problemas não resolvidos e esbarrámos com dificuldades e obstáculos que nos impedem a compreensão dos fenómenos do mundo exterior. Encontrámos na velha mecânica a pista da igualdade entre a massa de gravitação e a inércia. Vimos o carácter artificioso dos fluidos eléctricos e magnéticos. Admitimos a interacção entre a corrente eléctrica e a agulha magnética como dificuldade que não foi resolvida. Cumpre recordar que esta força não age na linha que liga o fio ao pólo magnético e depende da velocidade da carga em movimento. A lei que lhe expressa a direcção e a grandeza é extremamente complicada. E, finalmente, defrontámo-nos com as enormes dificuldades do éter.

Os físicos modernos atacaram e solucionaram todos estes problemas. Mas, na luta por tais soluções, novos e mais profundos problemas surgiram. O nosso conhecimento é hoje mais

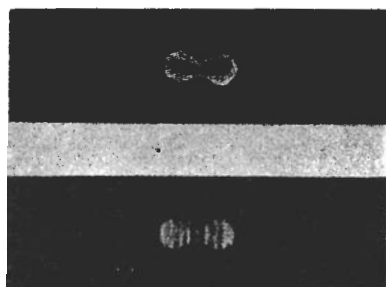
profundo e amplo do que o dos físicos do século XIX — mas as nossas dificuldades e dúvidas são também mais amplas e profundas.

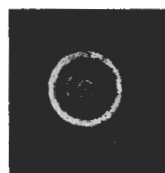
RESUMINDO:

*Nas velhas teorias dos fluidos eléctricos e da luz corpuscular ou ondulatória, vemos tentativas de aplicação do mecanicismo. Mas, no reino dos fenómenos ópticos e eléctricos, graves dificuldades nos defrontam.*

*Uma carga eléctrica em movimento age sobre a agulha magnética. Mas, em vez de depender apenas da distância, a força depende também da velocidade da carga. A força nem repele nem atrai, mas actua perpendicularmente à linha que liga a agulha à carga.*

*Na óptica tivemos de pender para a teoria ondulatória, contra a teoria corpuscular da luz. Ondas que se propagam num meio constituído por partículas accionadas por forças mecânicas, é sem dúvida um conceito mecânico. Mas através de que meio caminha a luz, e quais as propriedades mecânicas desse meio? Não há esperanças de reduzir o fenómeno óptico ao mecanicismo, antes de ser dada a resposta a esta questão.*

*As dificuldades na solução do problema, porém, são tamanhas, que temos de abandonar a luta — e com ela abandonar a teoria mecanicista.*

*(Fotografia de V. Arkadiev)*

*Em cima:* fotografia de manchas luminosas depois que dois raios atravessam dois furos de alfinete, um depois do outro. (Um dos furos foi aberto; foi depois tapado, antes de abrir-se o segundo). *Em baixo:* vemos que, quando a luz passa simultaneamente pelos dois furos, se formam listas

Difracção da luz em curva em redor de um pequeno obstáculo

*(Fotografia de V. Arkadiev)*

Difracção da luz que passa através de um pequeno furo

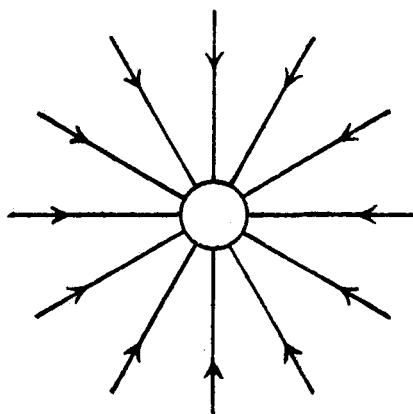
# CAMPO, RELATIVIDADE

## O CAMPO COMO REPRESENTAÇÃO

Durante a segunda metade do século XIX foram introduzidas na física ideias novas e revolucionárias; ideias que abriram o caminho para uma nova compreensão filosófica, diversa da compreensão mecanicista. O resultado dos trabalhos de Faraday, Maxwell e Hertz determinou o desenvolvimento da física moderna e levou-nos à criação de novos conceitos para a construção de um novo quadro da realidade.

A nossa tarefa agora resume-se em descrever os desmoronamentos que esses conceitos provocaram no campo científico e mostrar como gradualmente foram eles ganhando em clareza e vigor. Seguiremos neste estudo a marcha lógica, não nos incomodando com a ordem cronológica.

Os novos conceitos originaram-se no reino dos fenómenos eléctricos, mas é mais simples inicialmente apresentá-los através da mecânica. Sabemos que duas partículas se atraem mutuamente e que esta força de atracção decresce com o quadrado da distância. Podemos representar este facto de um modo diferente, ainda que seja difícil compreender que vantagens há. O círculo central do nosso desenho representa um corpo atractor, digamos o Sol. Na realidade a figura deve ser imaginada no espaço e não num plano. O círculo, portanto, vale por uma esfera no espaço, o Sol. Um corpo vindo de qualquer

parte para as proximidades do Sol, será atraído na direcção da linha que liga o centro do Sol ao desse corpo. Assim, as linhas do nosso desenho indicam a direcção da força de atracção do Sol para diferentes posições do corpo. A flecha de cada linha mostra que a força é dirigida para o Sol — a força de atracção. São estas as *linhas de força do campo gravítico*. De momento isto não passa de um nome e não há razão para mais. Mas no desenho há um aspecto característico que acentuaremos depois. As linhas de força são construídas no espaço

onde não existe matéria nenhuma. Por enquanto todas as linhas de força, ou, abreviadamente, o *campo*, indicam apenas como um corpo se comportaria na vizinhança da esfera para a qual o campo foi construído.

As linhas do nosso espaço-modelo são sempre perpendiculares à superfície da esfera. E desde que todas divergem de um ponto, são mais afastadas. Se aumentarmos de duas ou três vezes a distância da esfera, então a densidade das linhas do nosso modelo espacial (embora não no desenho) será quatro ou nove vezes menor. Deste modo as linhas servem a um propósito duplo. Primeiro, mostram a direcção da força

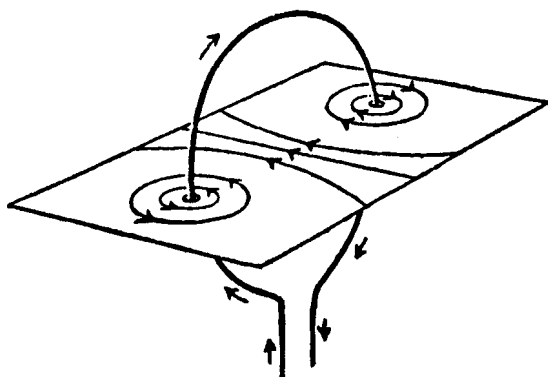
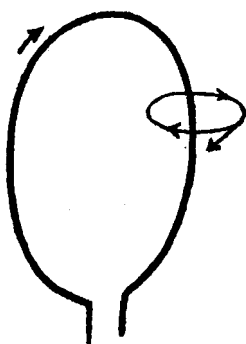
actuante sobre um corpo nas vizinhanças da esfera-sol. Segundo, a densidade das linhas no espaço mostra como a força varia com a distância. O desenho do campo, correctamente interpretado, representa a direcção da força gravítica e a sua dependência da distância. Em tal desenho podemos ler a lei da gravitação tão claramente como em palavras, ou na exacta e económica linguagem das matemáticas. Essa *representação do campo,* como lhe chamaremos, pode parecer clara e interessante, mas não há razão para crer que marque qualquer avanço positivo. Seria muito difícil provar a sua utilidade no caso da gravitação. Talvez alguém ache útil olhar essas linhas como algo mais que desenho, imaginando reais acções de força passando por elas. Isto pode acontecer, mas então a velocidade das acções ao longo das linhas de força devem ser tidas como infinitamente grandes! A força entre dois corpos, segundo a lei de Newton, depende só da distância; o tempo não entra no quadro. A força tem de passar de um corpo para outro em zero tempo! Mas como para uma pessoa razoável o movimento com velocidade infinita não quer dizer coisa nenhuma, a tentativa de fazer no nosso desenho algo mais que um modelo não leva a coisa nenhuma.

Não é nossa ideia no momento discutir a lei da gravitação. Este problema serviu-nos unicamente como introdução explanatória de similares métodos de raciocínio na teoria da electricidade.

Começaremos com a discussão da experiência que criou sérias dificuldades à interpretação mecânica dos fenómenos da Natureza. Já vimos uma corrente eléctrica fluindo através de um circuito em forma de círculo. No meio estava uma agulha magnética. No momento em que a corrente começou a fluir, uma força nova apareceu, a actuar sobre o pólo magnético e perpendicular à direcção das linhas que ligassem o fio ao pólo. Esta força, se causada por uma carga circulante, dependia, como a experiência de Rowland demonstrou, da velocidade da carga. Estes factos experimentais contradiziam o

conceito filosófico de que todas as forças agem na direcção da linha que liga as partículas e só dependem da distância.

A expressão exacta da força de uma corrente que actua sobre um pólo magnético é muito complicada — muito mais que a expressão das forças gravitacionais. Podemos, todavia, visualizar as acções, como o fizemos no caso da força gravitacional. Eis a nossa questão: com que força a corrente actua sobre um pólo magnético colocado na sua vizinhança? É um tanto difícil descrever esta força com palavras e mesmo a sua fórmula matemática seria complicada. Melhor será representar tudo quanto sabemos a respeito das forças actuantes por um desenho, ou, antes, por um modelo espacial, com linhas de força. Surgem algumas dificuldades causadas pelo facto de um pólo magnético só existir em conexão com outro pólo magnético, formando um dipolo. Podemos, todavia, imaginar a agulha magnética de tal extensão que unicamente a força actuante sobre o pólo mais próximo da corrente seja tomada em conta. O outro está distante de mais, de modo que a força que nele actua se torna desprezível. Para evitar ambiguidade diremos que o pólo magnético próximo do circuito é *positivo*.

O carácter da força actuante sobre o pólo magnético positivo está figurado no nosso desenho.

Primeiramente, vemos uma flecha próxima ao fio indicando a direcção da corrente, do mais alto ao mais baixo potencial. Todas as outras linhas são linhas de força desta corrente existentes num determinado plano. Quando traçadas, estas linhas poderão não somente informar-nos sobre a direcção do vector de força que representa a acção da corrente sobre um dado pólo magnético positivo, como ainda a respeito do comprimento desse vector. Força, como sabemos, é um vector, e para determiná-lo temos de conhecer a sua direcção e o seu comprimento. Estamos sobretudo preocupados com o problema da direcção da força actuante sobre um pólo. A nossa questão

é: como poderemos encontrar no desenho a direcção da força em qualquer ponto no espaço?

A regra para em tal modelo ler a direcção de uma força não é tão simples como no nosso exemplo anterior, no qual as linhas de força eram rectas. Para esclarecer o processo na figura abaixo só está desenhada uma linha de força.

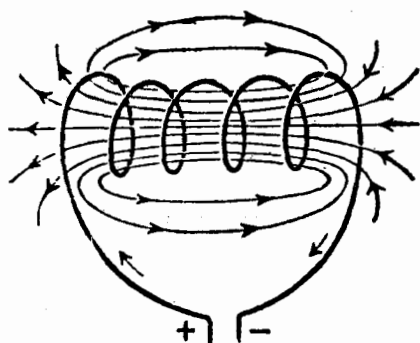
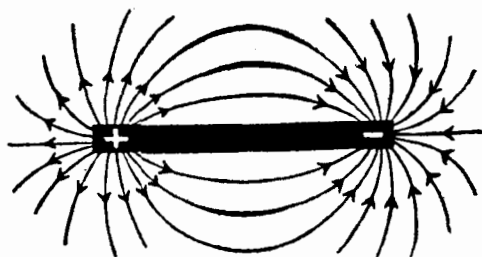
O vector da força é tangente à linha de força, como está graficamente indicado. A flecha do vector e as flechas da linha de força apontam para a mesma direcção. Assim, esta é a direcção em que a força age sobre um pólo magnético neste ponto. Um bom desenho, ou, melhor, um bom modelo espa-

cial, também nos diz alguma coisa sobre o comprimento do vector da força em qualquer ponto. Este vector tem que ser mais comprido onde as linhas são mais densas, isto é, próximo do fio, e mais curto onde as linhas são menos densas, isto é, longe do fio.

Deste modo as linhas de força, ou o campo, habilitam-nos a determinar as forças actuantes sobre um pólo magnético em qualquer ponto do espaço. Por enquanto é esta a única justificação da nossa laboriosa construção do campo. Sabendo o que o campo significa, examinaremos com muito mais interesse as linhas de força correspondentes à corrente. Estas linhas são círculos que envolvem o fio e estão num plano perpendicular àquele em que está situado o fio. Lendo no desenho o sentido da força, chegamos uma vez mais à conclusão de que ela age em direcção perpendicular a qualquer linha que ligue o fio ao ponto de acção da força, porque a tangente de um círculo é sempre perpendicular ao seu raio. Todo o nosso conhecimento das forças actuantes pode ser resumido na construção do campo. Entalámos o conceito de campo entre o da corrente e o do pólo magnético para representarmos as forças actuantes de um modo bem simples.

A cada corrente está associado um campo magnético, isto é, uma força actua sempre sobre um pólo magnético jacente perto do fio por onde a corrente flui. Notaremos de passagem que esta propriedade nos habilita a construir aparelhos sensíveis que assinalam a existência de uma corrente. Aprendido o modo de ler no modelo de campo de uma corrente o sentido das forças magnéticas, podemos traçar o campo que rodeia o fio por onde flui a corrente, de modo a representar a acção das forças magnéticas em qualquer ponto do espaço. O nosso primeiro exemplo é o chamado solenóide, que é uma espiral de arame como se vê no desenho abaixo. Queremos pela experiência apreender o mais que pudermos a respeito do campo magnético associado com a corrente que flui através do solenóide; esse conhecimento será incorporado à construção do

campo. O desenho representa o nosso resultado. As linhas curvas de força são fechadas e rodeiam o solenóide de um modo que caracteriza o campo magnético da corrente.

O campo de uma barra magnética pode ser representado como o fizemos para a corrente. O desenho seguinte mostra

isso. As linhas de força dirigem-se do pólo positivo para o negativo. O vector da força está sempre numa tangente à linha de força e é mais longo perto dos pólos, porque a densidade das linhas também é maior nesses pontos. O vector da força representa a acção do imã sobre um pólo magnético

positivo. Neste caso o magneto, e não a corrente, é a «fonte» do campo.

Os nossos dois últimos desenhos devem ser cuidadosamente comparados. No primeiro, temos o campo magnético de uma corrente que flui num solenóide; no segundo temos o campo magnético de uma barra magnética. Suprimamos o solenóide e a barra, para observarmos apenas os dois campos. Imediatamente veremos que são do mesmo carácter; nos dois casos as linhas de força vão de um extremo do solenóide ou da barra ao outro extremo do solenóide ou da barra.

A representação do campo dá o seu primeiro fruto! Seria difícil encontrar qualquer similaridade entre a corrente que flui no solenóide e uma barra se não fosse a revelação que nos dá a nossa construção do campo.

O conceito de campo pode ser agora submetido a uma prova muito mais rigorosa. Verificaremos em breve se há algo mais do que uma nova representação das forças actuantes. Podemos por um momento admitir que o campo caracteriza todas as acções de idênticas modalidades determinadas pelas suas duas diferentes fontes. Isto é apenas uma suposição, e quer dizer que, se um solenóide e uma barra magnética tiverem o mesmo campo, nesse caso todas as suas influências devem ser as mesmas. Quer dizer que dois solenóides conduzindo corrente eléctrica se comportam como duas barras magnéticas, atraindo-se ou repelindo-se, exactamente como no caso das barras, de acordo com as suas posições relativas. Também significa que um solenóide e uma barra se atraem e repelem do mesmo modo que duas barras. Em resumo: significa que todas as acções de um solenóide através do qual uma corrente flui são as mesmas que as de uma barra magnética, desde que só o campo é responsável por estas acções, e nos dois casos o campo tem o mesmo carácter. A experiência confirma em absoluto esta suposição!

Mas como seria difícil chegar a estes factos, se não fosse o conceito de campo! É muito complicada a expressão de uma

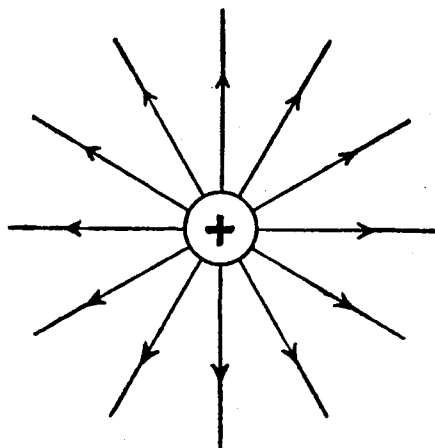
força actuante entre um pólo magnético e o fio através do qual a corrente flui. No caso dos dois solenóides teríamos de investigar as forças com que duas correntes agem entre si. Mas, se o fazemos com a ajuda do nosso campo, imediatamente apreendemos o sentido de todas aquelas acções, no momento em que percebemos a similaridade entre o campo de um solenóide e o de uma barra.

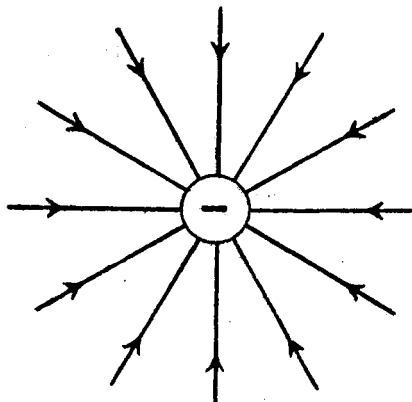
Temos o direito de olhar o campo como algo mais do que já vimos. As suas propriedades parecem essenciais à descrição dos fenómenos; as diferenças de fonte não importam. O conceito de campo revela a sua importância com levar-nos a novos factos experimentais.

O campo demonstrou ser um conceito útil. Começou como qualquer coisa colocada entre a fonte e a agulha magnética, de modo a descrever a força actuante. Foi imaginado como um «agente» da corrente, através do qual todas as acções da corrente eram realizadas. Mas agora esse agente também actua como um intérprete que traduz as leis em linguagem clara e facilmente compreensível.

A primeira vitória da descrição do campo sugere a conveniência de considerar o campo como intérprete de todas as acções de correntes, cargas e imãs. Um campo pode ser olhado como algo sempre em associação com a corrente. Ainda na ausência de um pólo magnético ele prova a existência da corrente. Experimentemos seguir esta nova pista.

O campo de um condutor carregado pode ser apresentado da mesma maneira que o campo gravítico ou o campo de uma corrente ou de um imã. Outra vez o exemplo mais simples! Para desenhar o campo de uma esfera de carga positiva, temos de indagar que tipo de forças estão agindo num corpo carregado positivamente e posto perto da fonte do campo, que será a esfera carregada. O facto de usarmos um corpo de carga positiva, em vez de negativa, é mera convenção, que serve para indicar a direcção em que as flechas da linha de força devem ser traçadas. O modelo é análogo ao do campo gravítico por

causa da similaridade entre a lei de Coulomb e a de Newton. A única diferença entre os dois modelos está em que as flechas apontam em direcções opostas. Na realidade temos repulsão de duas cargas positivas e atracção de duas massas. Mas o campo de uma esfera de carga negativa será idêntico ao campo gravítico, desde que a pequena carga positiva seja atraída pela fonte do campo.

Se os dois pólos, o eléctrico e o magnético, estão em repouso, não há entre eles acção, isto é, nem atracção, nem repulsão. Exprimindo na linguagem do campo este mesmo facto, podemos dizer: um campo electrostático não influencia um campo magnetostático, e vice-versa. As palavras «campo estático» significam um campo que não muda com o tempo. Os imãs e cargas permanecerão eternamente em repouso lado a lado, se nenhuma força externa interferir. Campo electrostático, magnetostático e gravítico são entretanto de diferente carácter. Não se confundem; cada qual preserva a sua individualidade.

Voltemos à esfera eléctrica, que até agora esteve em repouso, e admitamos que começa a mover-se em consequência da acção de qualquer força externa. A esfera carregada move-se. Quer dizer: o campo da carga eléctrica muda com o tempo.

Mas o movimento da esfera carregada é, como já vimos na experiência de Rowland, equivalente a uma corrente. E cada corrente é acompanhada de um campo magnético. A cadeia do nosso argumento torna-se esta:

movimento de carga ⟶ mudança de um campo eléctrico<br>
↓<br>
corrente ⟶ campo magnético associado

E concluímos: *a mudança de um campo eléctrico, produzida pelo movimento de uma carga, é sempre acompanhada por um campo magnético.*

A nossa conclusão baseia-se na experiência de Oersted,

mas diz mais. Contém em si o reconhecimento de que a associação de um campo eléctrico, que se movimenta no tempo, com um campo magnético, é essencial para a nossa argumentação posterior.

Enquanto uma carga estiver em repouso só há um campo electrostático. Mas um campo magnético aparece, logo que a carga começa a mover-se. Podemos dizer mais. O campo magnético criado pelo movimento da carga será tanto mais forte quanto maior for a carga e mais rápido o seu movimento. Isto também é uma consequência da experiência de Rowland. E de novo empregando a linguagem de campo poderemos dizer: quanto mais rapidamente o campo eléctrico muda, mais forte se torna o campo magnético que o acompanha.

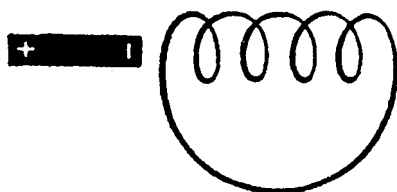
Procuramos aqui transladar factos familiares da linguagem dos fluidos, construídos de acordo com a velha teoria mecânica, para a nova linguagem do campo. Mais adiante veremos como esta linguagem é clara e instrutiva.

## OS DOIS PILARES DA TEORIA DE CAMPO

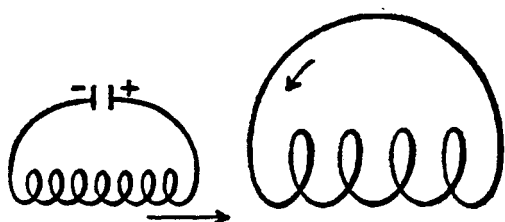
«A mudança de um campo eléctrico é acompanhada por um campo magnético.» Se trocarmos as palavras «eléctrica» e «magnética» a nossa proposição ficará assim: «A mudança de um campo magnético é acompanhada por um campo eléctrico.» Só a experiência pode decidir se há ou não verdade nisto. Mas a ideia de formular este problema foi sugerida pelo uso da linguagem de campo.

Há justamente cem anos Faraday realizou uma experiência de que adveio a grande descoberta das correntes indutivas.

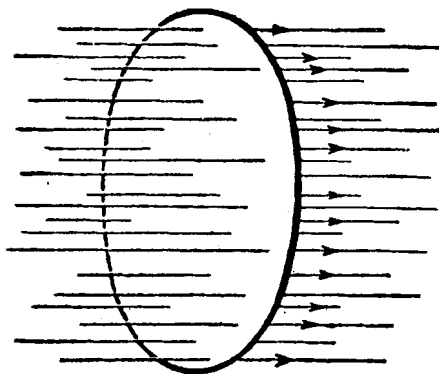
A demonstração é simples. Necessitamos apenas de um solenóide, ou qualquer outro circuito, uma barra magnética e um dos muitos tipos de aparelhos registadores da existência de uma corrente eléctrica. Começamos por manter uma barra

magnética em repouso perto de um solenóide que forme circuito fechado. Nenhuma corrente flui no fio, porque nenhuma fonte está presente. Só há o campo magnetostático da barra magnética, que não muda com o tempo. Alteremos agora a posição do imã, afastando-o ou aproximando-o do solenóide, à vontade: uma corrente aparecerá durante um curto intervalo de tempo e logo se esvairá. Sempre que a posição do imã é mudada, a corrente reaparece e pode ser registada por um aparelho suficientemente sensível.

Mas, do ponto de vista da teoria de campo, uma corrente significa a existência de um campo eléctrico que determina a passagem dos fluidos eléctricos através do fio. A corrente e, portanto, também o campo desaparecem quando o imã fica de novo em repouso.

Imaginemos por um instante que a linguagem de campo ainda não é conhecida e que os resultados desta experiência têm de ser descritos quantitativa e qualitativamente na linguagem da velha mecânica. A nossa experiência mostrará então que, pelo movimento de um dipolo magnético, uma força nova se criou, movendo o fluido eléctrico no fio. Surge a pergunta: de que depende esta força? Resposta difícil. Temos de investigar a dependência em que a força está da velocidade do imã, da sua forma e da forma do circuito. Além disso esta experiência, se interpretada na linguagem velha, não nos dá qualquer sugestão sobre se a corrente induzida pode ser excitada pelo movimento de outro circuito conduzindo uma corrente, em vez de pelo movimento de uma barra magnética.

Tudo mudará se empregarmos a linguagem de campo e admitirmos que a acção é determinada pelo campo. Vemos imediatamente que o solenóide através do qual a corrente flui serve tão bem quanto a barra magnética. O desenho mostra dois solenóides: um, pequeno, através do qual a corrente flui.

e o outro maior, no qual a corrente induzida é registada. Podemos mover o pequeno solenóide, como anteriormente movíamos a barra magnética, criando uma corrente induzida no solenóide maior. Além disso, em vez de mover o pequeno solenóide podemos criar e destruir um campo magnético pela criação ou destruição de uma corrente, isto é, abrindo ou fechando o circuito. Uma vez mais os novos factos sugeridos pela teoria de campo recebem a confirmação da experiência!

Tomemos um exemplo mais simples. Temos aqui um círculo fechado sem nenhuma fonte de corrente. Nas vizinhanças há um campo magnético. Não tem importância que a fonte desse campo magnético seja outro circuito através do qual a corrente flua, ou seja uma barra magnética. A nossa figura mostra o circuito fechado e as linhas de força magnética. A descrição qualitativa e quantitativa do fenómeno da indução torna-se muito simples quando feita na linguagem do campo. Como está marcado na figura, algumas linhas de força atravessam a superfície circular limitada pelo fio. Há que considerar as linhas de força que atravessam o plano que tem o fio como moldura. Nenhuma corrente eléctrica se manifesta en-

quanto o campo não muda, por maior que seja a força deste. Mas uma corrente começa a fluir através do fio logo que muda o número de linhas que atravessam a superfície cercada pelo fio. A corrente é determinada pela mudança do número de linhas que atravessam a superfície. Esta mudança no número

de linhas de força constitui o único conceito essencial para a descrição quantitativa e qualitativa da corrente induzida. «A variação do número de linhas» significa que a densidade das linhas muda, e isto, como já vimos, significa que a força do campo muda.

Mudança de campo magnético — corrente induzida — movimento de carga — existência de um campo eléctrico: eis os pontos essenciais da nossa cadeia de raciocínio.

Portanto: *um campo magnético variável é acompanhado por um campo eléctrico.*

Deste modo encontramos os dois mais importantes pilares de sustentação da teoria do campo eléctrico e do magnético. O primeiro é a conexão entre o campo eléctrico variável e o campo magnético. Decorre da experiência de Oersted sobre a

deflexão da agulha magnética e leva-nos a esta conclusão: *um campo eléctrico variável é acompanhado por um campo magnético.*

O segundo liga o campo eléctrico variável com a corrente induzida e decorre da experiência de Faraday. Ambos formam a base para a descrição quantitativa.

Novamente o campo eléctrico que acompanha o campo magnético variável nos aparece como algo real. Tivemos anteriormente de imaginar o campo magnético de uma corrente sem pólo. Semelhantemente, temos de alegar aqui que o campo eléctrico existe sem que o fio prove a presença de uma corrente induzida.

De facto, os nossos dois pilares podem ser reduzidos a um — o baseado na experiência de Oersted. O resultado da experiência de Faraday pode ser deduzido daquela por meio da lei da conservação da energia. Mantemos os dois pilares unicamente por amor à clareza.

Outra consequência da descrição de campo deve ser mencionada. Temos um circuito que recebe a corrente de uma pilha voltaica. A ligação entre o fio e a pilha, isto é, a fonte da corrente, interrompe-se bruscamente. Claro que não há mais corrente! Mas durante essa curta interrupção um intrincado processo se realiza — um processo que também poderia ser previsto pela teoria do campo. Antes da interrupção da corrente havia um campo magnético rodeando o fio. Esse campo cessou de existir quando a corrente foi interrompida. Portanto, graças à interrupção de uma corrente, um campo magnético desapareceu. O número de linhas de força passando através da superfície rodeada pelo fio mudou rapidamente. Mas essa rápida mudança criou uma corrente induzida. O que realmente importa é a mudança do campo magnético, sendo a corrente induzida mais forte se a mudança é maior. Esta consequência vale por outra prova da teoria. A interrupção de uma corrente deve ser acompanhada pelo surto de uma forte e momentânea corrente induzida. E a experiência confirma esta

predição. Quem quer que haja interrompido uma corrente terá notado a faísca que sai. Esta faísca revela a forte diferença de potencial causada pela rápida mudança do campo magnético.

O mesmo processo pode ser observado de outro ponto de vista — o da energia. Um campo magnético desaparece e uma faísca salta. Ora, uma faísca representa energia; logo, o campo magnético também representa energia. Usando com rigor o conceito de campo, temos de olhar o campo magnético como fonte de energia. Unicamente deste modo poderemos descrever os fenómenos eléctricos e magnéticos de acordo com a lei da conservação da energia.

Partindo de um engenhoso modelo, o campo torna-se cada vez mais real. Ajuda-nos a compreender velhos factos e leva-nos a novos. A atribuição de energia ao campo é um passo a mais no desenvolvimento do conceito de campo, e as ideias de substância essenciais na teoria mecânica perdem terreno.

## A REALIDADE DO CAMPO

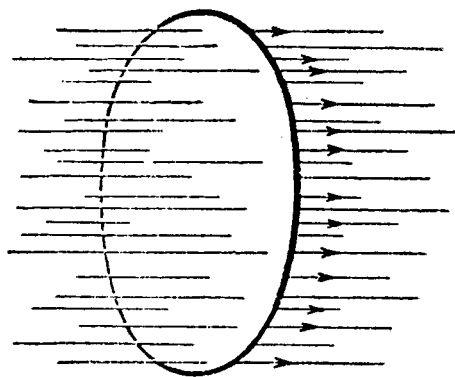
A descrição quantitativa, matemática, das leis do campo estão resumidas no que chamamos as «equações de Maxwell». Os factos até aqui mencionados levam-nos à formulação dessas equações, mas o seu conteúdo é mais rico do que podemos indicar. Só um estudo cuidadoso nos revela a sua profundidade.

A formulação dessas equações constitui o mais importante acontecimento da física desde Newton, não só por causa da riqueza do conteúdo, como também porque elas dão forma a um novo tipo de lei.

Os aspectos característicos das equações de Maxwell podem ser resumidos numa palavra. Representam a *estrutura* do campo.

Em que diferem em forma e carácter as equações de Maxwell das equações da mecânica? Que queremos dizer, afirmando que elas descrevem a estrutura do campo? Como é

possível que das experiências de Oersted e Faraday possamos criar um novo tipo de lei de tamanha importância para os futuros desenvolvimentos da física?

Vimos, da experiência de Oersted, como um campo magnético envolve um campo eléctrico variável; e da experiência de Faraday vimos como um campo eléctrico rodeia um

campo magnético variável. Para delinear algumas das características da teoria de Maxwell, ponhamos a nossa atenção numa destas duas experiências, a de Faraday, por exemplo. Vamos repetir a figura em que uma corrente é induzida por um campo magnético variável. Já sabemos que uma corrente induzida aparece quando o número de linhas de força passando pela superfície limitada pelo fio muda. A corrente aparecerá, se o campo magnético muda ou quando o circuito sofre deformação ou se movimenta: isto é, desde que o número de linhas magnéticas passando pela superfície mude, seja qual for a causa da mudança. Levar em conta todas estas várias possibilidades e discutir as suas influências, seria matéria para uma teoria muito complicada. Mas não poderíamos simplificar o problema? Experimentemos eliminar das nossas considerações tudo que

se refira à forma do circuito, seu comprimento e superfície circunscrita. Imaginemos que o circuito da nossa última figura se torna cada vez menor, reduzindo cada vez mais o espaço que ele circunscreve. Nesse caso, perde o valor tudo quanto diz respeito a forma e tamanho. Com o espaço limitado pelo circuito reduzido a um ponto, tamanho e forma são elementos que desaparecem — e nós obtemos leis que correlacionam as mudanças do campo eléctrico e magnético num arbitrário ponto do espaço, num arbitrário momento de tempo.

Eis um dos passos principais que levam às equações de Maxwell. Temos de novo aqui uma experiência idealizada imaginativamente — a repetição da de Faraday com um circuito reduzido a um ponto.

Seria melhor considerar meio passo, em vez de um passo inteiro. Até aqui a nossa atenção fixou-se na experiência de Faraday. Mas o pilar da nossa teoria, baseado na experiência de Oersted, tem que ser igualmente estudado e de maneira similar. Nesta experiência as linhas de força magnética rodeiam a corrente. Reduzindo-as a um ponto, o segundo meio passo estará obtido — e o passo inteiro revela correlação entre as mudanças dos campos eléctrico e magnético num arbitrário ponto no espaço, num arbitrário momento de tempo.

Mas há ainda outro passo indispensável. De acordo com a experiência de Faraday, deve existir um fio que prove a existência da corrente do campo eléctrico, como na experiência de Oersted deve existir um pólo magnético, ou agulha, que prove a existência de um campo magnético. Mas a teoria de Maxwell vai além destes factos experimentais. O campo eléctrico e magnético, ou, mais concentradamente, o campo *electromagnético*, é na teoria de Maxwell algo real. O campo eléctrico é produzido pela mudança do campo magnético, haja ou não o fio que prove a sua existência; um campo magnético é produzido pela mudança de um campo eléctrico, haja ou não um pólo magnético que prove a sua existência.

Assim, dois passos essenciais levam às equações de

Maxwell. Primeiro: de acordo com as experiências de Oersted e Rowland, a linha circular do campo magnético que rodeia a corrente, bem como o campo eléctrico variável, reduziram-se a um ponto; de acordo com a experiência de Faraday, a linha circular do campo eléctrico que rodeia o campo magnético também se reduziu a um ponto. O segundo passo consiste na admissão do campo como algo real; o campo electromagnético existe, age e muda de acordo com as leis de Maxwell.

As equações de Maxwell descrevem a estrutura do campo electromagnético. O espaço inteiro constitui o cenário dessas leis, e não, como na teoria mecânica, unicamente os pontos em que a matéria ou carga estão presentes.

Relembremos aqui a velha mecânica. Conhecendo a posição e velocidade de uma partícula num dado instante, e conhecendo as forças actuantes, toda a futura órbita da partícula poderia ser prevista. Na teoria de Maxwell, se conhecemos o campo num dado instante podemos deduzir como o campo inteiro muda no espaço e no tempo. Essas equações habilitam-nos a seguir a história do campo, do mesmo modo que as equações mecânicas nos habilitam a seguir a história das partículas materiais.

Mas há ainda uma diferença essencial entre as leis mecânicas e as equações de Maxwell. A comparação das leis da gravitação de Newton com as leis do campo de Maxwell frisam alguns aspectos característicos expressos por estas equações.

Com o auxílio das leis de Newton podemos deduzir o movimento da Terra pela força actuante entre a Terra e o Sol. As leis ligam o movimento da Terra com a acção do Sol. A Terra e o Sol, embora tão distantes, são actores no jogo das forças.

Em Maxwell não há actores materiais. As suas equações matemáticas expressam as leis que regem o campo electromagnético. Não ligam, como as de Newton, duas coisas amplamente separadas: não ligam o que acontece *aqui* com as condições de *além*. O campo *aqui* e *agora* depende do campo

de *imediata vizinhança*, num tempo recém-*passado*. Essas equações permitem-nos predizer o que acontecerá um pouco além no espaço, num tempo pouco depois, se sabemos o que acontece aqui e agora. Permitem-nos, passo a passo, o nosso conhecimento do campo. Por meio da soma desses passos podemos deduzir o que acontece aqui pelo que aconteceu longe daqui. Na teoria de Newton, pelo contrário, só são admissíveis os grandes passos que ligam coisas distantes. As experiências de Oersted e Faraday podem ser deduzidas da teoria de Maxwell, mas unicamente pela agregação de pequenos passos, cada um dos quais é governado pelas equações.

Um estudo mais profundo das equações de Maxwell mostra que novas e inesperadas conclusões podem ser extraídas, porque as consequências teóricas são de carácter quantitativo e reveladas por toda uma cadeia de argumentos lógicos.

Imaginemos de novo uma experiência idealizada. Uma pequena esfera com carga eléctrica é forçada por uma influência externa a oscilar rapidamente como um pêndulo... Com o conhecimento que já temos das mudanças do campo, como descrever em linguagem de campo tudo o que se passa?

A oscilação da carga produz um campo eléctrico variável, e por consequência também um campo magnético variável. Se um fio formando circuito é colocado nas vizinhanças, então novamente o campo magnético variável será acompanhado por uma corrente eléctrica no circuito. Isto não passa de mera repetição de factos conhecidos, mas o estudo das equações de Maxwell dá uma visão mais profunda do problema da carga oscilante. Por dedução matemática das equações de Maxwell podemos apreender o carácter do campo que rodeia uma carga oscilante, a sua estrutura próxima ou afastada da fonte e a sua variação com o tempo. O resultado de tal dedução foi a *onda electromagnética*. A energia escapa-se da carga oscilante, viajando com velocidade definida através do espaço; mas a transferência de energia — o movimento de um estado — é característica de todos os fenómenos de onda.

Diferentes tipos de onda já foram considerados. Vimos a onda longitudinal causada pela esfera pulsante, na qual as mudanças de densidade se propagam através do meio. Vimos o meio-geleia em que a onda transversal se propaga; uma deformação da geleia, causada pela rotação da esfera, movia-se através do meio. Que tipos de mudanças se dão agora no caso da onda electromagnética? Mudanças de um campo electromagnético! Cada mudança de um campo eléctrico produz um campo magnético; cada mudança deste campo magnético produz um campo eléctrico; cada mudança de..., e assim por diante. Como o campo representa energia, todas as mudanças realizadas no espaço, com velocidade definida, produzem uma onda. Como se deduz da teoria, as linhas eléctricas e magnéticas de força estão sempre em planos perpendiculares à direcção da propagação. A onda produzida é, por isso, transversal. Os aspectos originais do quadro do campo que formámos com as experiências de Oersted e Faraday ainda permanecem, mas vemos agora que possuem significação mais profunda.

A onda electromagnética propaga-se no espaço. Também isto decorre da teoria. Se subitamente a carga oscilante deixa de se mover, o seu campo torna-se electrostático. Mas as séries de ondas criadas pela oscilação continuam a propagar-se. As ondas têm existência independente e a história das suas mudanças pode ser acompanhada do mesmo modo que a de qualquer objecto material.

Outro ponto importante. Com que velocidade a onda electromagnética se propaga no espaço vazio? A teoria dá-nos resposta clara: *a velocidade de uma onda electromagnética é igual à velocidade da luz.*

As experiências de Oersted e Faraday formaram a base das leis de Maxwell. Todos os resultados até aqui obtidos provieram de um cuidadoso estudo destas leis, expresso em linguagem de campo. A descoberta teórica de uma onda electromagnética propagando-se com a velocidade da luz constitui uma das grandes conquistas da ciência.

Os factos experimentais confirmaram a predição da teoria. Pela primeira vez há cinquenta anos, Hertz provou a existência das ondas electromagnéticas, e experimentalmente confirmou que elas têm a velocidade da luz. Milhões de pessoas se utilizam hoje das ondas electromagnéticas, de toda e em toda a parte expedidas e recebidas. O aparelho em uso é muito mais complicado que o de Hertz, e apanha ondas partidas de milhares de quilómetros de distância, e não apenas de poucos metros.

## CAMPO E ÉTER

A onda electromagnética é transversal e propaga-se com a velocidade da luz no espaço vazio. O facto de essas velocidades serem idênticas sugere uma íntima relação entre os fenómenos ópticos e os electromagnéticos.

Quando tivemos de escolher entre a teoria corpuscular e a ondulatória, decidimo-nos em favor desta. A difracção da luz influiu na nossa escolha. Mas não contrariaremos nenhuma das explicações dos factos ópticos, se admitirmos que a onda *luminosa é electromagnética*. Pelo contrário; outras conclusões ainda podem ser tiradas. Se é realmente assim, então deve existir algum nexo entre as propriedades ópticas e eléctricas da matéria, que possa ser deduzido da teoria. O facto de que conclusões deste tipo possam ser tiradas, apoiando o julgamento da experiência, é um bom argumento a favor da teoria electromagnética da luz.

Este grande resultado devemo-lo à teoria do campo. Dois ramos da ciência, aparentemente sem ligação, socorrem-se da mesma teoria. As equações de Maxwell descrevem tanto a indução eléctrica como a refracção óptica. Se é nossa intenção descrever tudo que acontece, ou pode acontecer, por meio de uma teoria, então a união da óptica e da electricidade constitui um grande passo em frente. Do ponto de vista físico a única diferença entre a onda electromagnética e a onda de luz está

no comprimento: muito pequeno para as ondas luminosas perceptíveis pela vista humana, e grande para as ondas electromagnéticas captáveis pelos rádios-receptores.

A velha teoria mecânica tentou reduzir todos os fenómenos do mundo a forças actuando entre partículas. Uma das decorrências foi o ingénuo conceito dos fluidos eléctricos. Para os físicos do começo do século XIX o campo não existia. Só a substância e as suas mudanças eram reais. Procuravam descrever a acção de duas cargas eléctricas unicamente por meio de conceitos com elas relacionados.

No começo, o conceito de campo não passou de um modo de facilitar a compreensão dos fenómenos, à luz da teoria mecânica. Mas, na nova linguagem, é a descrição do campo entre as duas cargas, e não as cargas em si, que é essencial para a compreensão do modo como elas agem. A admissão dos novos conceitos foi rápida, e por fim a ideia de substância cedeu o lugar à ideia de campo. Vimos logo que algo de grande importância sucedera à física. Uma nova realidade se criava, um novo conceito sem cabimento na velha descrição mecânica. Lentamente, e com luta, o conceito de campo abriu caminho e entronizou-se como um dos conceitos básicos da física. Para os sábios de hoje o campo electromagnético é tão real como a cadeira em que se sentam.

Mas seria falso pensar que o novo conceito de campo libertou a ciência dos erros da teoria dos fluidos eléctricos, ou que a nova teoria destrói as conquistas da velha. A nova teoria ressalta os méritos, bem como as limitações, da velha, e habilita-nos a reconstruir os velhos conceitos por meio dessa revisão a nível mais alto. É isto verdadeiro não só para os conceitos de fluido e campo, como para todas as mudanças nas teorias físicas, por mais revolucionárias que pareçam. No caso em discussão, por exemplo, ainda encontramos na teoria de Maxwell o conceito da carga eléctrica, embora compreendido unicamente como fonte do campo eléctrico. A lei de Coulomb ainda está de pé e entra nas equações de Maxwell, das quais

pode ser deduzida como uma das suas muitas consequências. Podemos aplicar a velha teoria sempre que investigamos factos que a não invalidem. Mas também podemos aplicar a nova, desde que todos os factos conhecidos se ajustem dentro dela.

Falando imaginativamente, podemos dizer que o criar de uma nova teoria não corresponde ao demolir de um pardieiro para a construção de um arranha-céus. Será antes subir a uma montanha para alcançar visão mais dilatada e descobrir imprevistas ligações entre o nosso ponto de partida e os arredores. Mas o ponto de onde partimos ainda existe e pode ser visto, conquanto apareça cada vez menor e forme uma parte bem minúscula da grande paisagem desvendada pela ampliação do nosso campo visual.

Tempo se passou antes que o conteúdo total das teorias de Maxwell fosse apreendido. O campo foi no começo qualquer coisa que mais tarde tinha de receber interpretação mecânica com o auxílio do éter. Isso, porém, tornou-se impossível; os resultados da teoria de campo já se tinham mostrado muito sérios e vastos para caberem no velho molde. Além disso, o problema de prefigurar o modelo mecânico do éter ia-se aos poucos afastando de qualquer solução, em vista do carácter forçado e artificial desse meio.

A nossa única saída é tomarmos como assente que o espaço tem a propriedade física de transmitir ondas electromagnéticas — e não nos incomodarmos com a significação deste princípio. Podemos ainda usar a palavra *éter*, mas apenas para exprimir alguma propriedade física do espaço. Não será a primeira vez que no curso do desenvolvimento da ciência essa palavra muda de significação. Hoje já não é um «meio» constituído por partículas. Mas a sua história ainda está longe do fim, e vai ser continuada pela teoria da relatividade.

## O ANDAIME MECÂNICO

Neste ponto do nosso passeio temos de voltar atrás, à lei da inércia de Galileu. Diz ele:

> Cada corpo permanece no estado de repouso, ou de movimento uniforme em linha recta, quando não compelido a mudar de estado pela acção de forças sobre ele exercidas.

Uma vez compreendida a ideia de inércia, parece estranho que algo mais possa ser dito a respeito. O problema, entretanto, por mais discutido que tenha sido, ainda não está esgotado.

Suponhamos um sábio que admita que a lei da inércia pode ser provada ou negada por meio da experiência. Esse sábio impele pequenas bolas sobre uma mesa horizontal, procurando reduzir o atrito ao mínimo, e verifica que o movimento se torna mais uniforme quanto mais as bolas e a mesa são lisas. E quando está prestes a proclamar a lei de Galileu, alguém inesperadamente faz-lhe uma partida. O nosso sábio trabalha num aposento sem janelas, sem nenhuma comunicação com o mundo exterior. Alguém instala nas vizinhanças um mecanismo que faz o gabinete girar rapidamente sobre um eixo que lhe passa pelo centro. Logo que a rotação principia, o sábio depara com uma nova e imprevista experiência. As bolas, que estavam em movimento uniforme, procuram afastar-se o mais possível do centro e aproximar-se das paredes do compartimento. O próprio sábio sente uma estranha força impelindo-o de encontro à parede, experimentando a sensação que no comboio em marcha nos dá uma curva; ou, melhor, a sensação de um carrossel em movimento. Todos os resultados que ele obtivera no estudo da inércia se baralham.

O nosso sábio teria de desfazer-se da lei da inércia e consequentemente de todas as leis mecânicas. A lei da inércia fora o seu ponto de partida; se muda, haverá que mudar também

todas as conclusões. Um observador condenado a passar a vida inteira num gabinete rotativo, nele fazendo as suas experiências, teria necessidade de leis mecânicas diferentes das nossas. Se, por outro lado, ele penetra no gabinete com um profundo conhecimento e uma sólida fé nos princípios da física, a sua explicação para o aparente desastre da mecânica seria a de que o gabinete girava. E por meio de experiências mecânicas poderia ainda verificar como o gabinete girava.

Porque apresentamos aqui este exemplo do observador dentro de um recinto rotativo? Simplesmente porque nós, na Terra, de certo modo vivemos em situação semelhante. Copérnico ensinou-nos que a Terra gira sobre o seu eixo e se move em torno do Sol. Mas até essa ideia, tão simples e clara para todos, não foi deixada intacta pelos avanços da ciência. Por um momento, porém, ponhamos isto de lado e aceitemos o ponto de vista de Copérnico. Se o nosso observador rotativo não pôde confirmar as leis mecânicas, nós, no nosso planeta, também não o podemos fazer. Mas a rotação da Terra é relativamente morosa, de modo que os seus efeitos são pouco perceptíveis. Não obstante há muitas experiências reveladoras de um pequeno desvio das leis mecânicas, e *ipso facto* demonstradoras da rotação da Terra.

Infelizmente não conseguimos colocar-nos entre a Terra e o Sol para provar a perfeita validade da lei da inércia e ter a visão da Terra girando. Isto só pode ser feito em imaginação. Todas as nossas experiências têm que ser realizadas na Terra em que estamos. Ou, mais cientificamente: *a Terra é o nosso sistema coordenado.*

Para mostrar claramente a significação destas palavras, tomemos um exemplo. É-nos possível predizer, em qualquer momento, a posição de uma pedra lançada de uma torre e confirmar pela observação a predição. Se uma escala métrica for colocada ao longo da torre podemos predizer em que ponto dela estará a pedra num dado momento. A torre e a escala obviamente não devem ser feitas de borracha ou qualquer

material que possa sofrer alterações durante a observação. De facto, uma escala imutável, rigidamente ligada à terra, e um bom relógio são tudo quanto nos basta para a prova. Na posse disto, podemos ignorar não só a arquitectura da torre como a sua própria presença. Estas suposições são triviais e nunca recordadas na descrição de tais experiências — mas mostram como em cada afirmação nossa existem suposições ocultas. No caso presente, admitimos a existência de uma escala rígida e de um relógio, sem o que seria impossível provar a lei de Galileu relativa à queda dos corpos. Com esses simples, mas fundamentais, aparelhos físicos, uma escala e um relógio, podemos provar a lei da queda dos corpos com certo grau de precisão. Cuidadosamente realizada, a prova revelará discrepâncias entre a teoria e a experiência, devidas ao facto de que as leis mecânicas, como as temos, não são rigorosamente válidas num sistema coordenado rigidamente ligado à Terra.

Em todas as experiências mecânicas, de qualquer tipo que sejam, havemos que determinar posições de pontos materiais num tempo definido, como vimos acima prefigurada. Devemos ter o que chamamos o *sistema de referência*, um andaime mecânico que nos habilite a determinar a posição dos corpos. Na descrição da posição dos homens e coisas de uma cidade, as avenidas e ruas formam o sistema a que tudo se refere. Até aqui não nos preocupámos com descrever um sistema quando estabelecemos leis mecânicas, porque, como vivemos na Terra, não é difícil, em qualquer caso, fixar um ponto de referência rigidamente ligado a ela. Este sistema de referência de todas as nossas observações recebe o nome de *sistema coordenado*. Como vamos repetir muitas vezes esta expressão, por comodidade abreviá-la-emos em duas letras: SC. SC quer dizer, pois, Sistema Coordenado.

Em toda a exposição feita até aqui há a notar a falta de qualquer coisa. Essa falta é que todas as observações devem ser feitas em relação a um Sistema Coordenado, ou a um SC, mas em vez de descrever a estrutura deste SC, andamos a

passar por cima dele, não o tomando em consideração. Quando dizemos que «um corpo se move uniformemente...» deveríamos dizer: «um corpo move-se uniformemente em relação a um dado SC...» A nossa experiência com o gabinete rotativo ensina-nos que os resultados das experiências mecânicas podem depender do SC escolhido.

Se dois SC giram em relação um ao outro, as leis mecânicas não podem ser válidas em ambos. Se a superfície da água de uma piscina (um dos SC) é horizontal, então no outro a superfície de uma piscina similar toma a forma curva de quem mexe o café com a colherinha.

Quando estabelecemos as principais pistas mecânicas, deixámos de lado um ponto importante: não declarámos para que SC eram elas válidas. Por esse motivo, toda a velha mecânica está suspensa no ar, desde que não sabemos a que SC se refere. Mas de momento ponhamos isto de lado. Admitamos, para argumentar, que em cada SC rigidamente ligado à Terra as leis da velha mecânica são válidas. Embora saibamos que a Terra não é um adequado sistema de referência, momentaneamente admitamos que o seja.

Admitida fica, portanto, a existência de um SC para o qual as leis da mecânica são válidas. Mas será esse SC o único? Suponha-se que temos um SC tal como um comboio, um navio, um avião em movimento. Serão as leis da mecânica válidas para esses novos SC? Sabemos definidamente que nem sempre são válidas, como no caso do comboio que faz uma curva, de um navio que oscila nas ondas ou de um avião que desce em parafuso. Comecemos com o caso mais simples. Um SC move-se uniformemente em relação ao nosso «bom» SC — isto é, um no qual as leis mecânicas são válidas. Exemplo: um comboio ideal ou um navio em marcha lenta, em linha recta, com velocidade constante. Por observação diária sabemos que esses dois SC são «bons»; que as experiências físicas realizadas num comboio ou num navio desses dão os mesmos resultados que dariam se feitas na terra firme. Mas se o comboio pára ou

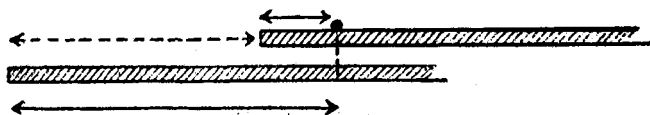
subitamente acelera a velocidade, ou se o mar está bravo, coisas estranhas acontecem. No comboio, as malas movem-se do lugar e no navio as cadeiras patinam e os viajantes enjoam. O que tudo significa que, do ponto de vista físico, as leis da mecânica não podem ser aplicadas a esses SC, que são «maus» SC.

Esta observação pode ser expressa pelo chamado «princípio da relatividade de Galileu»; *se as leis da mecânica são válidas num SC, então são também válidas para qualquer SC que se mova uniformemente em relação ao primeiro.*

Se temos dois SC que se movem não uniformemente em relação um ao outro, então as leis da mecânica não podem ser válidas em ambos. Aos «bons» SC, isto é, àqueles para os quais as leis mecânicas são válidas, nós chamamos sistemas *inerciais*. A questão de se um sistema inercial existe, ainda não está resolvida. Mas se acaso existe, então haverá um número infinito deles. Cada SC que se move uniformemente em relação ao SC inicial, é também um SC inercial.

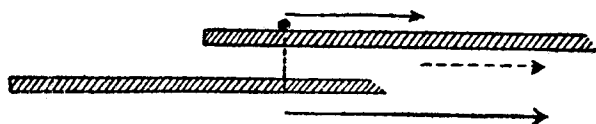
Consideremos o caso de dois SC que partem de uma posição conhecida e se movem uniformemente em relação um ao outro, com velocidade conhecida. Um comboio ou um navio, por exemplo. As leis da mecânica podem ser experimentalmente confirmadas tanto na terra como no comboio ou no navio de marcha uniforme. Mas dificuldades surgem se observadores dos dois sistemas começam a discutir observações do mesmo facto, feitas do ponto de vista dos seus diferentes SC. Cada qual quererá transladar as observações do outro para a sua própria língua. Mais um exemplo: o mesmo movimento de uma partícula é observado de dois SC, a terra e o comboio em marcha. Terra e comboio são inerciais. Mas bastará saber o que foi observado em um SC para conhecer o que foi observado no outro, se num dado momento as velocidades e posições dos dois SC forem conhecidas? Para a descrição de factos é essencial saber como passar de um SC para outro, desde que são ambos equivalentes e igualmente adequados à descrição dos

factos. Na realidade, basta conhecer os resultados de um para ter os de outro.

Consideremos a questão de um ponto de vista mais abstracto, sem comboio ou navio. Para simplificar a matéria investigaremos só o movimento em linha recta. Temos uma escala rígida e um relógio. A escala rígida representa, no movimento rectilíneo, um SC equivalente à escala da torre na experiência de Galileu. É sempre mais simples e melhor, no caso do movimento arbitrário no espaço, um andaime rígido composto de barras paralelas e perpendiculares, em vez de estarmos às voltas com torres, muros, ruas, etc. Suponha-se que temos, no nosso caso mais simples, dois SC, que são duas barras rígidas. Colocamo-las uma sobre a outra e passamos a denominá-las o «alto» e o «baixo» SC. Admitamos que os dois SC se movem com a velocidade definida um em relação ao outro, de modo que um desliza sobre o outro. Admitamos que as duas barras têm uma extensão infinita, tendo pontos iniciais, mas sem extremidades. Um relógio bastará para os dois SC, porque

o fluir do tempo é o mesmo para ambos. No começo da nossa observação o ponto de partida das duas barras coincidem. A posição de um ponto material é nesse momento determinada pelo mesmo número nos dois SC. Mas, se as barras se movem uniformemente, uma em relação à outra, os números correspondentes às posições dos pontos serão diferentes depois de certo tempo, digamos um segundo. Consideremos um ponto material da barra de cima. O número que determina a sua posição neste SC que permanece imóvel não muda com o tempo; mas o número correspondente na barra de baixo que desliza, muda. Em vez de «o número correspondente a uma

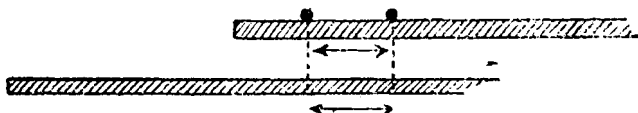
posição do ponto» diremos com mais brevidade a *coordenada de um ponto*.

Vemos no desenho que embora a sentença que segue pareça intrincada, exprime algo muito simples. A coordenada de um ponto no baixo SC é igual à sua coordenada no alto SC, mais a coordenada de origem do alto SC em relação ao baixo SC. A coisa importante é que sempre podemos calcular a posição de uma partícula num SC, se sabemos a sua posição no outro. Para esse fim temos de conhecer as posições relativas dos dois SC em cada momento. Embora isto pareça erudição, é na realidade muito simples e pouco merecedor de debate minucioso — e veremos a sua utilidade mais tarde.

É vantajoso notar a diferença entre determinar a posição

de um ponto e o tempo de um facto. Cada observador está com a sua barra, ou tem o seu SC, mas o relógio é comum a ambos. Tempo é algo «absoluto» que flui igualmente para os observadores de todos os SC.

Agora outro exemplo. Um homem caminha com a velocidade de três quilómetros por hora ao longo do convés de um navio. Três quilómetros é a velocidade em relação ao barco, ou, por outras palavras, relativa a um SC rigidamente ligado ao barco. Se a velocidade da embarcação é de trinta quilómetros por hora em relação à costa, e se as velocidades uniformes do homem e do navio têm a mesma direcção, nesse caso a velocidade do homem será de trinta e três quilómetros por hora em relação a um observador na costa, e de três quilómetros por hora em relação ao navio. Podemos formular mais abstractamente este facto: a velocidade de um ponto material

em movimento relativo ao baixo SC é igual à sua velocidade relativa ao alto SC, mais ou menos a velocidade do alto SC em relação ao baixo SC — conforme as velocidades têm a mesma ou oposta direcção. Podemos, pois, transformar não só as posições como também as velocidades, de um SC para outro, se conhecemos as velocidades relativas dos dois SC. As posições, ou coordenadas, e as velocidades, são exemplos de quantidades diferentes em diferentes SC ligados por certas *leis de transformação*.

Existem, todavia, quantidades que se conservam as mesmas nos dois SC e para as quais não necessitamos de nenhuma lei

de transformação. Tomemos como exemplo, não um, mas dois pontos fixos na barra de cima, e consideremos a distância que os separa. Esta distância é a diferença entre as coordenadas dos dois pontos. Para achar as posições de dois pontos relativos a diferentes SC, temos de empregar as leis de transformação. Mas, construindo as diferenças de duas posições, as transformações devidas aos diferentes SC anulam-se mutuamente e desaparecem, como vemos claramente no desenho. Temos de acrescentar e subtrair a distância entre as origens dos dois SC. A distância de dois pontos é por isso *invariante*, isto é, independente da escolha do SC.

O imediato exemplo de uma quantidade independente do SC é a mudança de velocidade, conceito que já estudámos na mecânica. Um ponto material movendo-se em linha recta é observado de dois SC. A sua mudança de velocidade é, para o observador de cada SC, uma diferença entre duas velocidades, e as transformações devidas ao movimento uniforme relativo dos dois SC anulam-se quando calculamos esta diferença. Por

isso a mudança de velocidade é uma «invariante», embora somente quando o movimento relativo dos nossos dois SC é uniforme. Entretanto a mudança de velocidade será diferente em cada SC, sendo esta diferença determinada pela variação de velocidade dos movimentos relativos das duas barras que representam os nossos sistemas coordenados.

E, por fim, um último exemplo! Temos dois pontos materiais, com forças actuando entre si, só na dependência da distância. No caso do movimento rectilíneo, a distância, e portanto a força, é invariante. A lei de Newton, que liga a força com a mudança de velocidade, é, pois, válida nos dois SC. Novamente chegámos a uma conclusão que a experiência de todos os dias confirma: se as leis da mecânica são válidas num SC, então são-no também em todos os SC de movimento uniforme em relação ao primeiro SC referido. Os nossos exemplos foram dos mais simples, mas as conclusões podem ser resumidas como se segue:

1. Não sabemos de regras para identificar um sistema inercial. Encontrado que seja um, podemos descobrir um número infinito, desde que os SC que se movem uniformemente um em relação ao outro são sistemas inerciais, já que um o é.

2. O tempo correspondente a um facto é o mesmo em todos os SC. Mas as coordenadas e velocidades são diferentes, e mudam de acordo com as leis da transformação.

3. Embora as coordenadas e a velocidade mudem quando passamos de um SC para outro, a força e a mudança de velocidade e, portanto, as leis da mecânica, são invariantes com respeito às leis da transformação.

Às leis de transformação para coordenadas e velocidades chamaremos «leis da velha mecânica», ou, mais sinteticamente: *transformação clássica*.

## ÉTER E MOVIMENTO

O princípio da relatividade de Galileu é válido para os fenómenos mecânicos. As mesmas leis da mecânica aplicam-se a todos os sistemas inerciais que se movem relativamente uns aos outros. Mas será princípio igualmente válido para os fenómenos não-mecânicos, sobretudo aqueles para os quais os conceitos de campo se revelaram tão importantes? Todos os problemas concentrados em redor deste ponto nos levam à teoria da relatividade.

Recordemos que a velocidade da luz *no vácuo*, ou no éter, é de trezentos mil quilómetros por segundo, e que essa luz é uma onda electromagnética que se propaga no éter. O campo electromagnético conduz energia que, uma vez emitida pela fonte, mostra vida independente. Por enquanto continuaremos a admitir o éter como o meio através do qual as ondas electromagnéticas, e, portanto, a luz, se propagam, embora reconheçamos as muitas dificuldades ligadas à estrutura mecânica desse éter.

Suponhamo-nos sentados num recinto estanque, tão isolado do mundo exterior que nem o ar entra ou sai. Se estamos falando, estamos do ponto de vista físico criando ondas de som que saem da fonte com a velocidade do som no ar. Se não houvesse no recinto nenhum ar, ou qualquer outro meio entre a boca que fala e o ouvido que ouve, não poderíamos ouvir nenhum som. A experiência tem mostrado que a velocidade do som no ar é a mesma em todas as direcções, se não há vento e o ar está em repouso no SC escolhido.

Imaginemos agora que o nosso recinto estanque se move uniformemente no espaço. Através das paredes de vidro do

recinto em movimento (ou comboio, se preferem) um homem de fora vê tudo quanto se passa lá dentro. Com base nas medições do observador que vai dentro, ele pode deduzir a velocidade do som relativa ao seu SC ligado ao meio circundante, e relativamente ao qual o recinto se move. Aqui temos de novo o velho e tão debatido problema da determinação da velocidade em um SC, caso já a tenhamos verificado num outro.

O observador dentro do recinto diz: a velocidade do som é para mim a mesma em todas as direcções.

O observador de fora diz: a velocidade do som propagada no recinto em movimento e determinada no meu SC, não é a mesma em todas as direcções. É maior que a velocidade normal do som na direcção do movimento do recinto em movimento e menor na direcção oposta.

Estas conclusões são tiradas da transformação clássica e podem ser confirmadas pela experiência. O recinto conduz dentro de si o meio material, o ar através do qual as ondas sonoras se propagam, e a velocidade do som será por isso diferente para os dois observadores, o interno e o externo.

Podemos ainda tirar outras conclusões da teoria do som como onda propagada através de um meio material. Um modo, embora não o mais simples, de não ouvirmos o que alguém está dizendo, é corrermos com velocidade maior que a do som produzido por quem fala. Nesse caso as ondas sonoras produzidas nunca nos alcançarão os tímpanos. Por outro lado, se perdermos uma palavra importante que nunca será repetida, temos, para apanhá-la, de correr com velocidade maior que a do som. Nada há de irracional nestes dois exemplos, excepto em que ambos os casos teríamos de correr com a velocidade de trezentos e sessenta metros por segundo, velocidade, aliás, que o desenvolvimento técnico pode tornar possível. Uma bala projectada por um canhão realmente move-se com velocidade maior que a do som, e um homem colocado dentro dessa bala nunca poderá ouvir o estrondo do tiro.

Todos estes exemplos são de carácter puramente mecânico, e permitem-nos formular estas importantes questões: ser-nos-á possível repetir para o caso da onda de luz o que dissemos da onda sonora? Aplicar-se-á tanto aos fenómenos mecânicos como aos ópticos e eléctricos o princípio de relatividade de Galileu e o da transformação clássica? Seria arriscado responder a estas perguntas com «sim» ou «não», antes de ver mais a fundo o que significam.

No caso da onda sonora no recinto em movimento uniforme relativo ao observador externo, os seguintes passos intermediários tornam-se essenciais para a nossa conclusão:

*A*) O recinto volante conduz o ar em que a onda sonora se propaga.

*B*) As velocidades observadas em dois SC que se movem uniformemente um em relação ao outro, são relacionadas pela transformação clássica.

O correspondente problema da luz tem que ser formulado de modo um pouco diverso. Os observadores do recinto volante já não estão falando, mas enviando sinais luminosos, ou ondas de luz, em todas as direcções. As ondas luminosas movem-se através do éter do mesmo modo que as ondas sonoras no ar.

Pergunta-se: é o éter conduzido pelo recinto como o foi o ar? Desde que não temos uma representação mecânica do éter, torna-se extremamente difícil responder à questão. Se o recinto é estanque, o ar de dentro tem que mover-se com ele. Já com o éter não podemos pensar assim, porque pela concepção que dele temos toda a matéria está nele imersa. Não pode haver janelas fechadas para o éter. O recinto volante, agora, significa apenas um SC em movimento, ao qual está rigidamente ligada a fonte de luz. Mas está em nós imaginar que o recinto volante com a sua fonte luminosa conduz consigo o éter, do mesmo modo que o ar e a fonte sonora eram conduzidos pelo recinto estanque. Mas também podemos imaginar o inverso: que o recinto caminha através

do éter como um navio sobre um mar perfeitamente calmo, sem levar consigo nenhuma parte desse mar. Na nossa primeira imagem, o recinto que se move com a fonte de luz conduz o éter. Uma analogia com a onda sonora é possível e conclusões similares podem ser tiradas. Na nossa segunda imagem, o recinto que se move com a fonte luminosa não conduz o éter. Não há aqui nenhuma analogia com a onda sonora, e as conclusões tiradas para o caso do som não servem para o caso da onda de luz. São estas as duas possibilidades. Podemos imaginar a possibilidade ainda mais complexa de que o éter só é parcialmente conduzido pelo recinto volante — mas não há razão para discutir o mais complexo antes de verificar o que diz a experiência em relação aos dois casos mais simples.

Vamos de momento retornar ao primeiro caso e admitir que o éter é conduzido pelo recinto volante. Se cremos no princípio da transformação das velocidades das ondas sonoras, podemos aplicar as nossas conclusões às ondas luminosas. Não há razão para duvidar da lei da transformação mecânica pela qual as velocidades têm que ser somadas em certos casos e subtraídas em outros. De momento, portanto, aceitemos a transformação clássica e a condução do éter pelo recinto volante.

Se eu acendo a luz, cuja fonte está rigidamente ligada ao meu recinto, esse sinal luminoso terá a velocidade conhecida de trezentos mil quilômetros por segundo. Mas, como o observador de fora percebe o movimento do recinto e portanto também o da fonte luminosa, a sua conclusão deve ser: a velocidade da luz no meu SC externo é diferente em diferentes direcções. Na direcção do movimento do recinto é maior que a velocidade normal; e na direcção oposta é menor. A nossa conclusão será: se o éter é levado com o recinto volante e se as leis da mecânica são válidas, então a velocidade da luz depende da velocidade da fonte de luz dentro do recinto volante. A luz que chega aos nossos olhos vinda de uma fonte

luminosa que se move, terá velocidade maior se o movimento é na nossa direcção, e menor, se é em direcção contrária.

Se a nossa velocidade fosse maior do que a da luz, poderíamos afastar-nos de um sinal luminoso. Chegando antes das ondas luminosas emitidas, poderíamos ver coisas do passado. Poderíamos apanhá-las em sentido contrário ao da emissão, e os acontecimentos do nosso planeta aparecer-nos-iam como um filme passado inversamente do fim para o começo. Todas estas conclusões resultam da admissão de que o SC em movimento conduz consigo o éter e as leis da transformação mecânica são válidas. Sendo assim, a analogia entre a luz e o som torna-se perfeita.

Mas não há qualquer indicação de que estas conclusões sejam verdadeiras. Pelo contrário, vemo-las rebatidas por todas as observações que tentam prová-las. Sobre isto não há a menor dúvida, embora a demonstração seja obtida por experiências indirectas, em virtude das dificuldades das directas. *A velocidade da luz, sempre a mesma em todos os SC, não depende do movimento, nem do modo de movimento da fonte luminosa.*

Não vamos detalhar as muitas experiências de que esta importante conclusão resulta. Podemos, todavia, usar alguns argumentos muito simples, que, embora não provem que a velocidade da luz não depende do movimento da fonte luminosa, tornam o facto compreensível.

No nosso sistema planetário, a Terra e os outros planetas movem-se em redor do Sol. Não sabemos da existência de outros sistemas planetários semelhantes ao nosso. Há, entretanto, muitos sistemas de estrelas duplas: duas estrelas que se movem ao redor de um ponto que é o seu centro de gravidade. A observação do movimento dessas estrelas demonstra a validade da lei da gravitação de Newton. Suponhamos agora que a velocidade da luz depende da velocidade do corpo que a emite. Nesse caso os raios de luz de uma estrela caminha-

riam mais rapidamente ou mais lentamente de acordo com a velocidade da estrela no momento do raio ser emitido. A confusão dos movimentos não permitiria aceitar a validez da lei de gravitação do nosso sistema planetário.

Vejamos outra experiência baseada numa ideia muito simples: uma roda que gira rapidamente. De acordo com a nossa suposição, o éter é conduzido pelo movimento e nele toma parte. Uma onda luminosa que passasse perto da roda teria uma velocidade quando a roda estivesse em movimento, e outra quando estivesse em repouso. A velocidade da luz no éter em repouso seria diferente da velocidade da luz no éter conduzido pela roda em movimento, do mesmo modo que a velocidade de uma onda sonora não é a mesma num dia calmo ou num dia de vento. Mas essa diferença não é apreendida! De qualquer ângulo que encaremos o assunto, e seja qual for a experiência que façamos, o veredicto é sempre contra a hipótese do éter conduzido pelo movimento. Assim. o resultado das nossas considerações vem a ser:

*A*) A velocidade da luz não depende do movimento da fonte emissora.

*B*) Não pode ser admitido que o corpo em movimento conduza consigo o éter envolvente.

Temos, portanto, de abandonar a analogia entre as ondas sonoras e as luminosas, e retornar à segunda possibilidade: que a matéria se move através do éter, o qual não toma parte no movimento. Isto quer dizer que admitimos a existência de um oceano de éter com todos os SC assentes nele ou movendo-se em relação a ele. Abandonemos por um instante a preocupação de que a experiência prove ou negue esta teoria, e familiarizemo-nos com a significação desta hipótese e com as conclusões que dela possam tirar.

Existe um SC em repouso em relação ao oceano-éter. Em mecânica, nenhum dos muitos SC em movimento uniforme em relação um ao outro pode ser distinguido. Todos esses SC

são igualmente «bons» ou «maus». Se temos dois SC em movimento uniforme, um em relação ao outro, nada significa, em mecânica, indagar qual deles está em movimento e qual em repouso. Só o movimento uniforme relativo pode ser observado. Com base no princípio da relatividade de Galileu não podemos falar do movimento uniforme absoluto. Que significa dizer que o movimento uniforme *absoluto* existe? Quer dizer que existe um SC no qual algumas leis da Natureza são diferentes das que regem todos os outros SC. Quer dizer ainda que cada observador pode apreender se o seu SC está em repouso ou em movimento, pela comparação das leis nele válidas com as que só são válidas no SC com o monopólio de possuir o repouso absoluto.

Que conclusões há a tirar se admitirmos o movimento através do éter? Que existe um SC distinto de todos os outros, em repouso relativamente ao oceano-éter. Torna-se perfeitamente claro que algumas das leis da Natureza devem ser diferentes neste SC; de contrário a expressão «movimento através do éter» não teria sentido. Se o princípio da relatividade de Galileu é válido, então o movimento através do éter não tem sentido. Impossível conciliar as duas ideias. Se, entretanto, existe um SC especial fixo no éter, nesse caso as expressões «movimento absoluto» e «repouso absoluto» têm significação definida.

Não há escolha. Procuramos salvar o princípio da relatividade de Galileu com a admissão de que sistemas coordenados conduzem no seu movimento o éter, mas isto choca-se com a experiência. O único meio de sair do impasse é abandonar o princípio da relatividade de Galileu e admitir a ideia de que todos os corpos se movem através do calmo oceano-éter.

O passo imediato é estudar algumas conclusões que contradizem esse princípio de Galileu e apoiam a ideia do movimento através do éter, e submetê-las à prova da experiência. Tais experiências são fáceis de imaginar e difíceis de realizar.

Mas, como estamos lidando com ideias, não nos preocupam dificuldades materiais.

Voltemos de novo ao nosso recinto volante e aos dois observadores, o interno e o externo. O externo representará o SC normal, designado pelo oceano-éter. Nele a velocidade da luz tem sempre o mesmo valor estabelecido. Todas as fontes de luz, em movimento ou em repouso no oceano-éter, a emitem com a mesma velocidade. O recinto volante e o seu observador interno movem-se no éter. Imagine-se que a luz dentro dele se acende e apaga, e que as paredes são transparentes, de modo que os dois observadores podem medir-lhe a velocidade. Se indagarmos das medições que esses observalores obtiveram, a resposta será assim:

*Observador externo:* O meu SC é designado pelo oceano--éter, e nele a luz tem o valor normal. Não me preocupa que a fonte de luz ou outros corpos estejam ou não em movimento, porque o meu éter não é conduzido por essa fonte de luz ou esses corpos. O meu SC distingue-se de todos os outros e a velocidade da luz tem neste SC o seu valor exacto, independente da direcção do raio luminoso ou do movimento da sua fonte.

*Observador interno:* A minha sala, ou recinto, move-se através do oceano-éter. Uma das paredes afasta-se da luz e outra aproxima-se dela. Se a minha sala viajasse com a velocidade da luz, então a luz emitida do centro dela jamais alcançaria a parede que se afasta com a velocidade da luz. Se a sala caminhasse com a velocidade menor que a da luz, então a onda emitida do centro dela alcançaria uma das paredes antes de alcançar a outra. A parede que se move para a luz seria alcançada antes da que se afasta da luz. Por isso, embora a fonte de luz esteja rigidamente ligada ao meu SC, a velocidade da luz não será a mesma em todas

as direcções. Será menor na direcção do movimento da parede que se afasta e maior na direcção contrária.

Assim, só no SC distinguido pelo oceano-éter a velocidade da luz seria igual em todas as direcções. Para outros SC em movimento relativo ao oceano-éter, dependerá da direcção que medirmos.

Essa experiência crucial habilita-nos a tirar a prova da teoria do movimento através do oceano-éter. A Natureza, de facto, põe à nossa disposição um sistema móvel de alta velocidade: a Terra na sua rotação em redor do Sol. Se a nossa suposição está certa, então a velocidade da luz na direcção do movimento da Terra diferirá da velocidade da luz na direcção oposta. As diferenças podem ser calculadas e uma experiência pode ser concebida. Uma experiência famosa foi imaginada por Michelson e Morley, de que resultou a «morte» da teoria do calmo oceano-éter através do qual a matéria se moveria. Não foi encontrada nenhuma dependência da velocidade em relação à direcção da luz. Nem a velocidade da luz, nem qualquer outro fenómeno de campo mostraram depender dos SC em movimento, se a teoria do oceano-éter fosse levada em conta. Todas as experiências ulteriores têm dado a mesma negativa da de Michelson-Morley, não revelando qualquer dependência entre a luz e a direcção do movimento da Terra.

A situação torna-se cada vez mais séria. Duas suposições foram experimentadas. A primeira, que os corpos em movimento conduzem consigo o éter. O facto de que a velocidade da luz não depende do movimento da origem contradiz esta suposição. A segunda, que existe um SC distinto e que os corpos em movimento não levam consigo o éter, mas caminham nele como num mar calmo. Mas, se é assim, então o princípio da relatividade de Galileu não é válido, e a velocidade da luz não pode ser a mesma em cada SC. Novamente temos a experiência a contrariar a suposição.

Outras teorias ainda mais artificiais foram propostas, como a de que o éter só é conduzido parcialmente. Mas falha-

ram. Todas tentaram explicar o fenómeno electromagnético num SC em movimento com o auxílio do movimento do éter, ou com o movimento através do éter, ou com ambos, e todas falharam.

E temos aqui uma das mais dramáticas situações reveladas pela história da ciência. Todas as suposições relativas ao éter não conduziam a nada! A experiência vetou-as todas! Olhando para trás vemos que o éter, logo depois de nascido, se tornou o «*enfant terrible*» do clã das substâncias físicas. Primeiramente, a construção de uma imagem mecânica do éter revelou-se impossível, sendo abandonada. Isto foi em grande parte a causa do desmoronamento da teoria mecanicista. Depois, tivemos de abandonar a esperança de que através ou por meio da presença do oceano-éter um SC pudesse permanecer à parte e permitir a admissão do movimento absoluto, não apenas do relativo. Isto teria sido o único meio de o éter justificar a sua existência. Até este momento todas as nossas tentativas para tornar o éter uma realidade falharam. O éter não revelou a sua estrutura mecânica, nem revelou movimento absoluto. Nada ficou de todas as propriedades do éter, salvo aquela para qual fora inventado: a capacidade de transmitir as ondas electromagnéticas. As nossas tentativas para descobrir as suas propriedades levaram-nos a dificuldades e contradições. Depois desta odisseia, claro que chegou o momento de esquecermos o éter, e de nem sequer lhe pronunciarmos mais o nome. Devemos dizer: o espaço tem a propriedade de transmitir ondas — evitando deste modo a enunciação de uma palavra morta.

A omissão de uma palavra do nosso vocabulário, entretanto, não constitui remédio para o nosso caso. Há muita coisa mais a ser resolvida ainda!

Mencionemos os factos suficientemente confirmados pela experiência, sem mais nos preocuparmos com o problema do «é...»:

1. A velocidade da luz num espaço vazio tem um valor fixo, independente do movimento da fonte luminosa e do receptor da onda.

2. Em dois SC que se movem uniformemente em relação um ao outro, todas as leis da Natureza são exactamente idênticas, e não há meio de distinguir o movimento uniforme absoluto.

Muitas experiências confirmam estas conclusões e nenhuma as infirma. A primeira afirmação expressa o carácter constante da velocidade da luz; a segunda generaliza o princípio da relatividade de Galileu formulado para os fenómenos mecânicos, ou seja tudo que acontece na Natureza.

Na mecânica já vimos que, se a velocidade de um ponto material é tal em relação a um SC, então será diferente para outro SC que se mova uniformemente em relação ao primeiro. Isto decorre dos princípios da transformação mecânica. É dado imediatamente pela nossa intuição (um homem movendo-se em relação ao navio e à praia) e aparentemente nada pode estar errado! Mas esta lei da transformação mecânica está em contradição com o carácter constante da velocidade da luz. Daí um terceiro princípio:

3. Posições e velocidades são transformadas de um sistema inercial para outro de acordo com a transformação clássica.

A contradição torna-se evidente. Não podemos combinar as três conclusões. A transformação clássica parece muito óbvia e simples para que alguém tente mudá-la. Já experimentámos mudar o (1) e o (2) e a experiência desautorizou-nos. Todas as teorias relativas ao movimento do «e-r» requerem uma alteração do (1) e do (2). Uma vez mais verificámos

o carácter muito sério das nossas dificuldades. Necessitamos de uma nova pista — a qual é dada pela *aceitação da suposição fundamental* (1) e (2) e, por mais estranho que o pareça, pela rejeição de (3). A nova pista parte de uma análise do conceito mais fundamental e primitivo; vamos mostrar como esta análise nos força a mudar as nossas velhas ideias e remove todas as dificuldades.

## TEMPO, DISTÂNCIA, RELATIVIDADE

As nossas suposições são:

1. *A velocidade da luz no vácuo é a mesma em todos os SC que se movem uniformemente uns em relação aos outros.*

2. *Todas as leis da Natureza são as mesmas em todos os SC que se movem uniformemente uns em relação aos outros.*

A teoria da relatividade começa com estas duas suposições. De agora em diante não usaremos a transformação clássica, porque já sabemos que ela contradiz tais suposições.

É essencial aqui, como o é sempre na ciência, desligarmo-nos dos preconceitos profundos, frequentemente repetidos sem nenhum discernimento. Desde que vimos que as mudanças em (1) e (2) levam a contradições com a experiência, precisamos ter a coragem de admitir-lhes claramente a validade e atacar o ponto possivelmente fraco — o modo pelo qual posições e velocidade são transformadas de um SC para outro. A nossa intenção é tirar conclusões de (1) e (2); ver onde e como essas suposições contradizem a transformação clássica; e encontrar a significação física dos resultados obtidos.

Uma vez mais o exemplo da sala volante pode ser usado.

Sinais são emitidos do centro da sala, e de novo perguntamos aos dois observadores, o interno e o externo, o que é que eles contam observar, admitindo-se unicamente os nossos dois princípios e esquecendo quanto foi dito em relação ao meio através do qual a luz caminha. Eis o que responderão:

*Observador interno:* O sinal luminoso que parte do centro da sala alcançará as duas paredes ao *mesmo tempo*, uma vez que as paredes estão a igual distância da fonte luminosa e a velocidade da luz é a mesma em todas as direcções.

*Observador externo:* No meu SC a velocidade da luz é exactamente a mesma observada dentro da sala volante. Pouco importa que a fonte de luz se mova ou não no meu SC, desde que o movimento da fonte não influencia a velocidade da luz. O que vejo é um sinal luminoso viajando com a velocidade normal, que é a mesma em todas as direcções. Uma das paredes da sala volante procura fugir, e outra procura aproximar-se do sinal luminoso. Por isso, a parede que foge será atingida pelo sinal luminoso um pouco depois de esse sinal ter atingido a parede que se aproxima. Embora a diferença seja mínima, se a velocidade da sala for pequena em comparação com a da luz, o sinal luminoso não alcançará simultaneamente as duas paredes opostas, que são perpendiculares à direcção do movimento.

Comparadas as respostas dos dois observadores, o resultado contradiz os conceitos, na aparência, bem fundados da física clássica. Dois factos, isto é, os dois raios de luz que alcançam as paredes, são simultâneos para o observador de dentro, mas não o são para o de fora. Na física clássica temos um relógio só para todos os observadores em todos os SC. O tempo, e, portanto, palavras tais como «simultaneamente», «mais cedo», «mais tarde», têm uma significação absoluta, que depende de qualquer SC. Dois factos sucedidos ao mesmo tempo num SC são necessariamente simultâneos em todos os outros SC.

As suposições (1) e (2), isto é, a teoria da relatividade, força-nos a abandonar este ponto de vista. Descrevemos dois factos conhecidos ao mesmo tempo num SC, mas em tempos diferentes noutro SC. A nossa tarefa é compreender esta consequência — compreender a significação destas palavras: «Dois factos simultâneos num SC podem não ser simultâneos em outro.»

Que queremos dizer com «dois factos simultâneos num SC»? Intuitivamente todo o mundo julga compreender a significação da frase. Mas temos de desconfiar da intuição. Estudemos o caso, mas antes disso há uma questão a propor.

Que é um relógio?

A impressão subjectiva do fluir do tempo leva-nos a admitir que um facto acontece antes e outro depois. Mas, para mostrar que o intervalo de tempo entre os dois factos é, por exemplo, de dez segundos, temos necessidade do relógio. O relógio objectiva o conceito de tempo. Qualquer fenómeno físico pode ser usado como relógio, contanto que seja repetido quantas vezes o desejarmos. Tomando como unidade de tempo o intervalo entre o começo e o fim de um facto, intervalos arbitrários de tempo podem ser medidos pela repetição deste processo físico. Todos os relógios se baseiam nesta ideia. Na ampulheta a unidade de tempo é o intervalo da passagem da areia da parte superior para a inferior. Virando-se a ampulheta, o fenómeno repete-se.

Em dois pontos distanciados temos dois relógios perfeitos que marcam exactamente o mesmo tempo. Mas que acontece na realidade? Como podemos ter a certeza de que dois relógios distanciados um do outro mostram exactamente o mesmo tempo? Um método de *contrôle* poderia ser a televisão — mas não se esqueça que lembramos isto como exemplo e não como essencial à nossa argumentação. Posso estar junto a um dos relógios e pela televisão ver o outro. É-me possível então julgar se de facto marcam o mesmo tempo. Mas isto não constituiria boa prova. A visão do outro relógio, que eu receberia

pela televisão, ser-me-ia dada por uma onda electromagnética — a qual caminha com a velocidade da luz. De modo que não há simultaneidade, porque, no relógio junto a mim, vejo uma coisa já passada, já atrasada. Mas esta dificuldade pode ser removida se eu receber pela televisão a representação dos dois relógios; para isso basta que eu esteja entre ambos, igualmente afastado de ambos. Nesse caso, se a imagem dos dois me for transmitida simultaneamente, recebê-los-ei no mesmo instante.

Na mecânica usávamos um só relógio, o que nos forçava a tomar todas as medidas na vizinhança desse relógio. Mas, olhando para o relógio a distância, por meio, por exemplo, da televisão, havemos sempre de nos lembrar de que o que no momento estamos vendo aconteceu um pouco antes, como se dá no caso do pôr do Sol, que vemos oito minutos depois de o Sol estar desaparecido. Cumpre, pois, fazer correcções em todas as nossas leituras de tempo.

É portanto inconveniente ter um só relógio. E como nos é dado saber o meio de verificar a harmonia de vários relógios, podemos imaginá-los tantos quantos quisermos num dado SC, cada qual a determinar o tempo do que sucede, na sua vizinhança. Os relógios estão todos em repouso relativo ao SC. São «bons» relógios e *sincronizados*, o que significa que mostram simultaneamente o tempo.

Estamos, pois, agora, usando muitos relógios sincronizados em vez de um só, e facilmente poderemos julgar se dois factos são ou não simultâneos num dado SC. Dizer que um dos factos distantes acontece antes de outro é coisa que já tem significação definida.

Isto representa um acordo com a velha física e não uma contradição com a transformação clássica.

Para a definição de factos simultâneos, os relógios são sincronizados por meio de sinais. Torna-se essencial, no nosso esquema, que esses sinais caminhem com a velocidade da luz, isto é, a velocidade que representa o papel fundamental na teoria da relatividade.

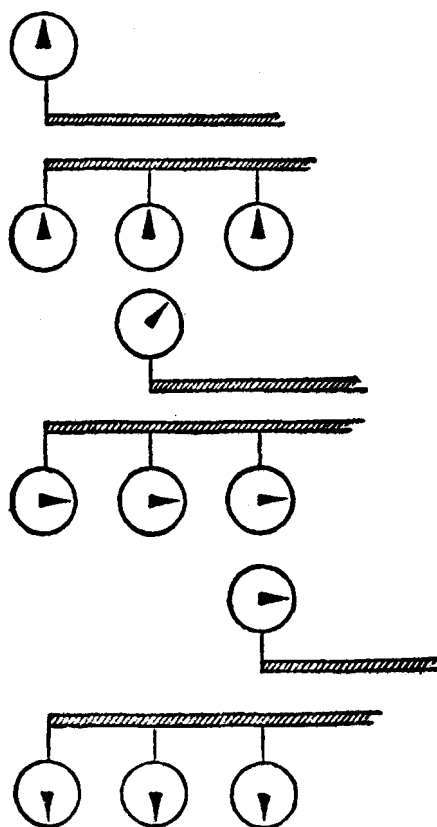
Desde que desejamos tratar do importante problema de dois SC em movimento uniforme relativo um ao outro, temos de considerar duas barras, cada qual com o seu relógio. O observador em cada um dos dois SC está com a sua barra e os seus relógios rigidamente fixos.

Quando na mecânica clássica discutimos medidas, usámos um relógio para todos os SC; aqui, temos muitos relógios em cada SC. Esta diferença não tem importância. Um relógio seria suficiente, mas ninguém pode objectar contra o emprego de muitos, desde que todos funcionem sincronizadamente.

Estamo-nos aproximando do ponto em que a transformação clássica se põe em contradição com a teoria da relatividade. Que acontece quando dois conjuntos de relógios se movem uniformemente em relação recíproca? O velho físico responde: nada; conservam o mesmo ritmo, e para a marcação do tempo tanto podemos usar relógios em repouso como relógios em movimento. De acordo com a velha física, dois factos simultâneos em um SC são também simultâneos noutros SC.

Mas esta não é a única resposta possível. Igualmente podemos imaginar um relógio em movimento que tenha um ritmo diferente de outro em repouso. Discutamos esta possibilidade sem por enquanto decidir se os relógios mudam de ritmo com o movimento. Que queremos dizer com a suposição de que um relógio em movimento muda de ritmo? Admitamos, por amor à simplicidade, que temos um só relógio no alto SC e muitos no baixo SC. Todos possuem o mesmo maquinismo, e os do baixo SC são sincronizados, isto é, mostram simultaneamente o mesmo tempo. Desenhemos agora três posições subsequentes de dois SC em movimento relativo um ao outro. No primeiro desenho as posições dos ponteiros dos relógios de cima e de baixo são convencionalmente as mesmas. Todos os relógios mostram o mesmo tempo. No segundo desenho vemos as posições relativas dos dois SC algum tempo depois. Todos os relógios no baixo SC mostram o mesmo tempo,

mas o relógio no alto SC está fora do ritmo. O ritmo mudou e o tempo difere, porque o relógio se move em relação ao baixo SC. No terceiro desenho vemos na posição dos ponteiros a diferença aumentada com o tempo.

Um observador em repouso no baixo SC pode verificar que um relógio em movimento muda de ritmo. A mesma coisa se o relógio se movesse em relação ao observador em repouso no alto SC; neste caso haveria muitos relógios no alto SC

e um só no baixo. As leis da Natureza devem ser as mesmas nos dois SC que se movem em relação um ao outro.

Na mecânica antiga era tacitamente admitido que um relógio em movimento não mudava de ritmo. Isto parecia óbvio de mais para ser lembrado. Mas nada deve parecer óbvio de mais; se realmente visamos a precisão, temos de analisar todas as suposições até aqui sagradas da física.

Uma suposição não pode ser considerada como não razoável simplesmente porque contraria as da física clássica. Podemos, pois, imaginar que um relógio movente muda de ritmo, se as leis da mudança são as mesmas para todos os SC inerciais.

Ainda outro exemplo. Tomemos um metro material, isto é, uma vara que tem um metro de comprimento, enquanto está em repouso num SC. Façamo-lo mover-se uniformemente sobre a barra que representa o SC. O comprimento da vara parecerá ainda de um metro? Temos preliminarmente de saber como determinar a extensão da vara. Enquanto ela estava em repouso, as suas extremidades coincidiam com a marca de um metro no SC. Disto concluímos que a extensão da vara em repouso era de um metro. Mas como medi-la durante o movimento? Poderá ser assim: num dado momento dois observadores fotografam simultaneamente as extremidades da vara. Se os instantâneos foram tirados simultaneamente, podemos comparar as marcas na barra SC com que as extremidades da vara coincidem. Estará determinada a sua extensão. Não há razão para crer que o resultado de tal medida seja o mesmo obtido no caso da vara em repouso. Desde que as fotografias foram tomadas simultaneamente, o que vem a ser, como já vimos, um conceito relativo dependente do SC, parece possível que os resultados da mensuração sejam diferentes, em diferentes SC que se movem em relação um ao outro.

Podemos imaginar que não só o relógio movente muda de ritmo como também que a vara movente muda de extensão,

já que para todos os SC inerciais as leis de mudança são as mesmas.

Apenas temos discutido algumas novas possibilidades, sem dizer como as justificamos.

Relembremos isto: a velocidade da luz é a mesma em todos os SC inerciais. Impossível conciliar este facto com a transformação clássica. O círculo deve ter-se quebrado em qualquer parte. Não será justamente aqui? Não poderemos supor mudanças no ritmo do relógio e na extensão da vara que provenham directamente da constância da velocidade da luz? Na realidade podemos! E aqui está o primeiro exemplo de radical desacordo entre a velha física e a teoria da relatividade. O nosso argumento pode inverter-se: se a velocidade da luz é a mesma em todos os SC, então a vara movente pode mudar de extensão e o relógio movente pode mudar de ritmo. com as leis que governam essas mudanças rigorosamente determinadas.

Nada há de misterioso nisto. Na física velha sempre foi admitido que relógios em movimento e em repouso têm o mesmo ritmo, e que varas em movimento e em repouso têm a mesma extensão. Se a velocidade da luz é a mesma em todos os SC e se a teoria da relatividade é válida, neste caso temos de sacrificar essa admissão. É muito difícil desfazermo-nos de velhas ideias, mas não há remédio. Do ponto de vista da relatividade os conceitos antigos parecem arbitrários. Porque havemos de crer no tempo absoluto, fluindo do mesmo modo para todos os observadores em todos os SC? Porque havemos de crer em distância imutável? O tempo é determinado pelos relógios; o espaço é coordenado por varas; o resultado das determinações pode depender do comportamento desses relógios e varas quando em movimento. Não há motivo para crer que se comportem como nós desejamos que se comportem. A observação mostra indirectamente, por meio dos fenómenos do campo electromagnético, que um relógio em movimento

muda de ritmo e uma vara em movimento muda de extensão, embora com base nos fenómenos físicos nunca supuséssemos que assim fosse. Temos de aceitar o conceito do tempo relativo em cada SC, porque é o melhor meio de vencermos as dificuldades. Posterior avanço científico oriundo da relatividade mostra que este novo aspecto não deve ser considerado um mal necessário, visto serem evidentes os méritos da teoria.

Até aqui temos procurado mostrar o que leva às suposições fundamentais da teoria da relatividade, e como essa teoria força a revisão da transformação clássica por meio de um novo exame do tempo e do espaço. O nosso objectivo é indicar as ideias básicas de uma nova física e de uma nova visão filosófica. Essas ideias são simples; mas na forma em que aqui foram formuladas não levam a conclusões ao mesmo tempo quantitativas e qualitativas. Temos de voltar ao nosso velho método de explicar só as ideias principais e apresentar outras sem provas.

Para tornar clara a diferença entre as ideias dos velhos físicos e as dos modernos, imaginaremos um diálogo entre A e M — o antigo e o moderno.

A: Creio no princípio da relatividade de Galileu, porque sei que as leis da mecânica são as mesmas para dois SC que se movem uniformemente em relação um ao outro, ou por outras palavras, porque essas leis são invariantes relativamente à transformação clássica.

M: Mas o princípio da relatividade deve ser aplicado a todos os factos do mundo externo. Não só as leis da mecânica, mas também todas as leis da Natureza devem ser as mesmas nos SC que se movem uniformemente em relação um ao outro.

A: De que modo podem as leis da Natureza ser as mesmas para esses SC? As equações de campo de Maxwell não são invariantes relativamente à transformação clássica. O fenó-

meno da velocidade da luz mostra-o com clareza. De acordo com a transformação clássica, essa velocidade não pode ser a mesma nos dois SC.

M: Isto apenas mostra que a transformação clássica não pode ser aplicada e que a conexão entre dois SC deve ser diferente; que nós não podemos ligar coordenadas e velocidades como é feito nessas leis de transformação. Temos de apresentar novas leis deduzidas das suposições fundamentais da relatividade. Não nos incomodemos com a expressão matemática dessas novas leis de transformação; contentemo-nos com saber que são diferentes das clássicas. E denominemo-las abreviadamente *transformação de Lorentz*. Pode ser mostrado que as equações de Maxwell, isto é, que as leis de campo são invariantes para a transformação de Lorentz, do mesmo modo que as leis da mecânica são invariantes para a transformação clássica. Lembremo-nos de como era na física clássica. Tínhamos leis de transformação para coordenadas, leis de transformação para velocidades; mas as leis da mecânica eram as mesmas para os dois SC em causa. Tínhamos leis de transformação para o espaço, mas não para o tempo, porque o tempo era o mesmo em todos os SC. Na teoria da relatividade não é assim. Temos leis de transformação diferentes das clássicas para o espaço, o tempo e a velocidade. Mas as leis da Natureza devem ser as mesmas para todos os SC. As leis da Natureza devem ser constantes, não, como antes, em relação à transformação clássica, mas em relação ao novo tipo de transformação, o de Lorentz. Em todos os SC inerciais as mesmas leis são válidas e a transição de um para outro é dada pela transformação de Lorentz.

A: Aceito isso que diz, mas quero conhecer a diferença entre a transformação clássica e a de Lorentz.

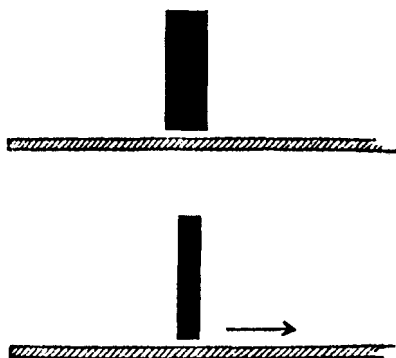
M: Cite alguns aspectos da transformação clássica e eu procurarei explicar se estão ou não preservados na de Lorentz, e em caso contrário que mudanças sofreram.

A: Se algo acontece em certo ponto e em certo tempo no meu SC, então o observador em outro SC, que se move uniformemente em relação ao meu, marca um diferente número para a posição em que isso acontece, mas marca o mesmo tempo. Usámos o mesmo relógio em todos os nossos SC, e não tem importância que o relógio se mova. É isto também verdadeiro para a sua teoria?

M: Não. Cada SC deve ser equipado com os seus próprios relógios em repouso, uma vez que o movimento lhes muda o ritmo. Dois observadores em dois diferentes SC assinalam não só diferentes números para a posição, como também para o tempo em que algo acontece.

A: Isso quer dizer que o tempo não é uma invariante. Na transformação clássica o tempo é sempre o mesmo em todos os SC. Na de Lorentz o tempo muda, comporta-se como a coordenada na velha transformação. E que há com a distância? Na mecânica antiga a vara mantém a sua extensão tanto no movimento como no repouso. E na nova?

M: Na nova, não. Da transformação de Lorentz decorre que a vara em movimento se contrai na direcção do movimento, e tanto mais quanto mais aumenta a velocidade. Quanto mais rapidamente a vara se mover, mais curta parecerá. Mas isto só ocorre na direcção do movimento. Do meu desenho pode ver-se a vara reduzida à metade da sua extensão,

quando em movimento com velocidade aproximada de noventa por cento da luz. Na direcção perpendicular ao movimento, porém, não há contracção, como se vê do segundo desenho.

A: Isso significa que o ritmo de um relógio em movimento e a extensão de uma vara em movimento dependem da velocidade. Mas como?

M: As mudanças tornam-se mais distintas à proporção que a velocidade cresce. Da transformação de Lorentz decorre que a vara se reduziria a zero, se a velocidade alcançasse a da luz. Similarmente, o ritmo de um relógio em movimento torna-se mais lento comparado com o dos relógios fixos da barra de referência, e chegaria a zero se o relógio se movesse com a velocidade da luz, isto é, se o relógio fosse «bom».

A: Isso parece contradizer todas as nossas experiências. Sabemos que um carro não fica mais curto quando em movimento, e também sabemos que o condutor desse carro pode sempre comparar o seu «bom» relógio com os que vê pelo caminho, verificando que estão certos — o que é contrário à asserção acima.

M: Não contesto. Mas essas velocidades mecânicas são muito pequenas comparadas com a da luz, e torna-se grotesca a aplicação da relatividade a tais fenómenos. Cada condutor de carro pode aplicar com segurança a física antiga, ainda que aumente a velocidade do carro cem mil vezes. Só podemos esperar desacordo entre a experiência e a transformação clássica quando as velocidades se aproximem da da luz. Só com as máximas velocidades a validade da transformação de Lorentz pode ser verificada.

A: Mas há outra dificuldade. De acordo com a velha mecânica posso imaginar corpos com velocidades ainda maiores que a da luz. Um corpo que se move com a velocidade da luz, posto em relação com um navio em marcha, move-se em relação à praia com velocidade maior que a da luz. Que acontece à vara que encolhe a zero quando a velocidade iguala a da luz? Não podemos esperar uma extensão negativa, com sinal (—), se a velocidade é maior que a da luz.

M: Não há razão para tal sarcasmo! Do ponto de vista da relatividade, um corpo material não pode ter velocidade maior que a da luz. A velocidade da luz é o limite último da velocidade de todos os corpos materiais. Se a velocidade do corpo for igual à da luz relativamente a um navio, será também igual à da luz relativamente à praia. A simples lei mecânica de adicionar e subtrair velocidades já não é válida, ou, mais precisamente, só é válida para pequenas velocidades — não para as que se aproximam da da luz. O número que exprime a velocidade da luz aparece explicitamente na transformação de Lorentz, e desempenha o papel de um limite, como na velha mecânica a velocidade infinita. Esta teoria mais geral não contradiz a trasformação clássica nem a velha mecânica. Pelo contrário, revalida os velhos conceitos, mas limitando-os aos casos de pequenas velocidades. Do ponto de vista da relatividade ressaltam os casos em que a física antiga é válida e dentro de que limites tem de ficar. Seria grotesco

aplicar a teoria da relatividade a movimento de carros, navios e comboios, como seria tolo usar a máquina de calcular quando uma simples tabuada de multiplicação é suficiente.

## RELATIVIDADE E MECÂNICA

A teoria da relatividade nasceu por força das sérias, profundas e insolúveis contradições da teoria clássica. E a sua força jaz na consistência e simplicidade com que resolve todas essas contradições por meio do emprego de umas poucas e muito convincentes suposições.

Embora a relatividade se erguesse do problema de campo, tem que abarcar todas as leis físicas. Uma dificuldade se apresenta. As leis de campo, de um lado, e as leis mecânicas, de outro, são de diferentes tipos. As equações do campo electromagnético são invariantes com respeito à transformação de Lorentz e as equações mecânicas são invariantes com respeito à transformação clássica. Esta transformação não passa de um caso especial daquela em que as velocidades são pequenas. Se é assim, a velha mecânica deve mudar de modo a conformar-se com a exigência de invariabilidade da transformação de Lorentz. Por outras palavras: a velha mecânica não pode ser válida para velocidades que se aproximem da da luz. Só uma transformação de um SC em outro pode existir: a de Lorentz.

Foi simples mudar a velha mecânica de modo que não contradissesse nem a teoria da relatividade nem a riqueza do material clássico. A velha mecânica é válida para as pequenas velocidades e forma um caso limite da mecânica nova.

Seria interessante considerar algum exemplo de mudança na mecânica antiga introduzida pela relatividade.

Admitamos um corpo de massa definida, que se move em linha recta e no qual actua uma força externa na direcção do seu movimento. A força, como sabemos, é proporcional

à variação da velocidade. Ou, para sermos mais explícitos, não importa se um dado corpo aumenta a sua velocidade de 100 a 101 pés por segundo, ou de 100 a 100 milhas e 1 pé por segundo, ou de 180 000 a 180 000 milhas e 1 pé por segundo. A força actuante sobre um dado corpo é sempre a mesma para a mesma mudança de velocidade no mesmo tempo.

É isto verdadeiro do ponto de vista da relatividade? De modo nenhum! Esta lei só vale para as pequenas velocidades. E qual, na teoria da relatividade, a lei para as grandes velocidades próximas da da luz? Se a velocidade é grande, forças extremamente fortes são requeridas para aumentá-la. E, quando uma velocidade é igual à da luz, é impossível aumentá-la ainda mais. Assim, as mudanças trazidas pela teoria da relatividade não são de surpreender. A velocidade da luz é o limite último para todas as velocidades. Nenhuma força finita, por maior que seja, pode determinar um aumento de velocidade além desse limite. Em vez da velha lei mecânica, que liga a força e a mudança de velocidade, uma nova lei aparece, mais complexa. Do novo ponto de vista a velha mecânica parece-nos simples, porque em todas as nossas observações só lidamos com velocidades muito menores que a da luz.

Um corpo em repouso tem massa definida, dita massa *em repouso*. Sabemos pela mecânica que cada corpo resiste a mudanças no seu movimento; maior a massa, maior a resistência. Mas, na teoria da relatividade, temos algo mais. Não só um corpo resiste mais à mudança, se a massa em repouso é maior, como também se a sua velocidade é maior. Corpos com velocidades próximas da da luz oferecerão resistência muito forte às forças externas. Na velha mecânica a resistência de um dado corpo era qualquer coisa de imutável, caracterizada apenas pela sua massa. Na relatividade a resistência torna-se infinitamente maior à medida que a velocidade se aproxima da da luz.

Os resultados habilitam-nos a submeter a relatividade

à prova da experiência. Projécteis com velocidades próximas da da luz resistirão à acção de uma força externa, como admite a teoria? Desde que o estabelecido na relatividade tem carácter quantitativo, podemos aceitar ou rejeitar a teoria, se conseguirmos ou não a possibilidade de emitir projécteis com velocidades próximas da da luz.

E na Natureza encontramos projécteis com tais velocidades. Os átomos da matéria radioactiva — do rádio, por exemplo — agem como baterias que lançam projécteis com enormes velocidades. Sem entrarmos em detalhes, podemos citar unicamente uma das muitas e importantes novas concepções da química e da física modernas. Toda a matéria do Universo é composta de *partículas elementares* de uns tantos tipos. Tal como numa grande cidade, em que o mais imponente arranha-céu e a mais humilde barraca fossem construídos com o mesmo tipo de tijolos, ou de muito poucos tipos de tijolos. Assim, todos os elementos do nosso mundo material, desde o hidrogénio, que é o mais leve, até ao urânio, que é o mais pesado, são fabricados com os mesmos tipos de tijolos — as partículas elementares. Os edifícios mais complicados, isto é, os elementos mais pesados, são instáveis e desintegram-se, isto é, são *radioactivos*. Alguns dos tijolos, isto é, as partículas elementares de que os átomos radioactivos são construídos, projectam-se com velocidade que às vezes se aproxima da da luz. O átomo de um elemento como o rádio é uma estrutura complicada, e a desintegração radioactiva é um dos fenómenos em que a constituição dos átomos revela ser de partículas ainda mais elementares.

Por meio de engenhosas experiências, podemos verificar como as partículas resistem à acção de uma força externa. Essas experiências mostram que a resistência oferecida pelas partículas depende da velocidade delas, como a relatividade o previu. Em muitos casos em que a dependência da resistência à velocidade é apreendida, a experiência revela completo acordo com a teoria. Vemos aqui uma das mais importantes

feições do trabalho científico de criação: predizer factos que depois a experiência vem confirmar.

Este resultado sugere uma importante generalização. Um corpo em repouso tem massa mas não tem energia cinética. Um corpo em movimento tem ambas as coisas, e resiste à mudança de velocidade muito mais fortemente que o corpo em repouso. Parece que a energia cinética do corpo movente lhe amplia a resistência. Se dois corpos têm a mesma «massa-em-repouso», o de maior energia cinética resiste mais fortemente à acção de uma força externa.

Imaginemos uma caixa contendo bolas, em repouso no nosso SC. Para movê-la há necessidade de uma força. Mas, pergunto: a mesma força lhe aumentará a velocidade, do mesmo valor e no mesmo tempo, com as bolas a moverem-se rapidamente dentro da caixa, em todas as direcções, como as moléculas de um gás, com velocidade próxima da da luz? Para mover a caixa uma grande força será necessária, porque a energia cinética das bolas aumenta a resistência da caixa. A energia resiste ao movimento do mesmo modo que a massa. Será isto verdade para todos os tipos de energia?

A relatividade deduz da sua suposição fundamental uma resposta clara e convincente — resposta de carácter quantitativo: toda a energia resiste à mudança de movimento; toda a energia se comporta como matéria; um pedaço de ferro pesa mais quando rubro do que quando frio; a radiação que viaja pelo espaço e vem do Sol contém energia e tem, portanto, massa; o Sol e todas as estrelas perdem massa ao emitirem radiação. Esta conclusão geral é uma importante vitória da relatividade e adequa-se a todos os factos com que é verificada.

A velha física introduziu duas substâncias: matéria e energia. A primeira tem peso; a segunda, não. Na velha física temos duas leis de conservação: uma para a matéria, outra para a energia. Já indagámos se a física moderna mantém

esses conceitos, e vimos que não. Em vez de duas leis de conservação só temos uma — a de energia-massa. De acordo com a relatividade, não há distinção essencial entre massa e energia. A energia tem massa e massa representa energia — conceito que se revelou fecundo.

Mas como permaneceu tanto tempo ignorado o facto de a energia ter massa e de a massa representar energia? É o peso de um pedaço de ferro aquecido ao rubro maior do que resfriado? A resposta de hoje é «sim», mas na página 44 deste livro foi «não» — e o texto intercalado entre as duas respostas não basta para explicar a contradição.

A dificuldade com que nos defrontamos é do mesmo tipo da que defrontámos antes. A variação da massa que a teoria predisse é incomensuravelmente menor e não pode ser averiguada pela medição directa, ainda que nas mais sensíveis balanças. A prova de que a energia tem peso, deve ser feita por meios indirectos.

A razão desta falta de prova imediata está na pequenez da taxa de câmbio entre a matéria e energia. Comparada à massa, a energia é como a moeda de um país falido comparada com o dólar. Um exemplo esclarecerá o ponto. A quantidade de calor capaz de converter trinta mil toneladas de água em vapor pode pesar um grama! A energia foi por tanto tempo considerada sem peso, porque a massa que ela representa é muito pequena.

A velha energia-substância: eis outra vítima da relatividade. A primeira vítima foi o meio através do qual as ondas de luz se propagavam — o «e—r».

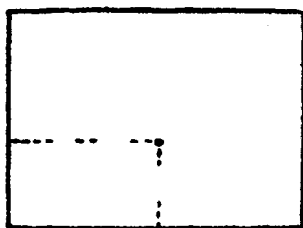
A influência da teoria da relatividade vai muito além do problema que a gerou. Essa teoria remove as dificuldades e as contradições da teoria do campo; formula leis mecânicas mais gerais; substitui duas leis de conservação por uma só; muda o nosso conceito clássico de tempo. A sua validade não se restringe ao domínio da física; forma o sistema geral de todos os fenómenos da Natureza.

## O CONTÍNUO ESPAÇO-TEMPO

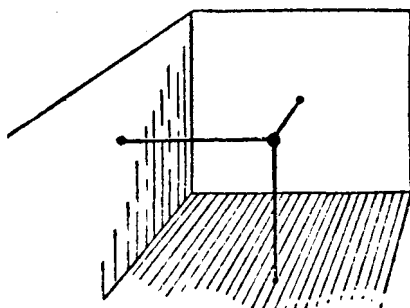
«A Revolução Francesa começou em Paris no dia 14 de Julho de 1789.» Nesta sentença estão declarados o lugar e o tempo de um facto histórico. Ouvindo-a pela primeira vez, uma pessoa que não sabe o que é «Paris» pode ser instruída assim: uma cidade situada a 2° de longitude Este e 49° de latitude Norte. Os dois números caracterizarão o lugar, e o «14 de Julho de 1789» caracterizará o tempo. Em física, muito mais do que na história, é muito importante a exacta caracterização do quando e do onde de um facto, porque são dados que formam a base da descrição quantitativa.

Até aqui, por amor à simplicidade considerámos apenas o movimento em linha recta. A barra, com uma extremidade inicial mas sem fim, foi o nosso SC. Conservemos esta restrição. Tomemos diferentes pontos nessa barra; as posições desses pontos podem ser caracterizadas por um número apenas — a coordenada desse ponto. Dizer que a coordenada de um ponto é de sete mil quinhentos e oitenta e seis pés significa que ele está a sete mil quinhentos e oitenta e seis pés de distância da extremidade inicial da barra. Se, pelo contrário, alguém me dá qualquer número e uma unidade, eu posso encontrar o ponto da barra correspondente a esse número. E estabelecemos: um ponto definido na barra corresponde a cada número, e um número definido corresponde a cada ponto. Os matemáticos expressam isto na seguinte sentença: todos os pontos da barra formam um contínuo *unidimensional.* Existe sempre um ponto tão próximo quanto possível de cada ponto da barra. Podemos ligar dois pontos distintos por meio de passos tão pequenos quanto o queiramos. A pequenez indefinida dos passos que ligam pontos distantes caracterizam o contínuo.

Agora, outro exemplo. Temos um plano, ou, se preferem coisa mais concreta, a superfície de uma mesa. A posição de um ponto nesta mesa pode ser caracterizada por dois números,

e não, como antes, por um só. Os dois números são as distâncias deste ponto às beiras perpendiculares da mesa. Não um número, mas dois números, correspondem a cada ponto do plano da mesa; um ponto definido corresponde a um par de números. Por outras palavras o plano é um *contínuo bidimensional*. Existem pontos indefinidamente próximos a cada ponto do plano. Dois pontos distintos podem ser ligados por uma curva dividida em passos tão pequenos quanto quisermos. Assim, a indefinida pequenez dos passos ligadores de dois

pontos distantes, cada qual representado por dois números, novamente caracteriza um contínuo bidimensional.

Mais outro exemplo. Imagine-se o nosso gabinete como nosso SC. Isto quer dizer que desejamos descrever todas as posições em relação às paredes da sala. A posição da lâmpada em repouso pode ser descrita por três números; dois que determinam as distâncias entre a lâmpada e as paredes perpendiculares; e o terceiro, a distância entre o tecto ou o soalho. Três números definidos correspondem a cada ponto do espaço; um ponto definido no espaço corresponde a três números. Isto se exprime pela sentença: o *espaço é um contínuo tridimensional*. Existem pontos extremamente próximos de cada ponto do espaço. Outra vez a indefinida pequenez dos passos que ligam pontos distantes, cada qual representado por três números, mostra-se característica de um contínuo tridimensional.

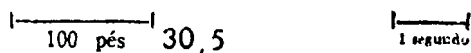
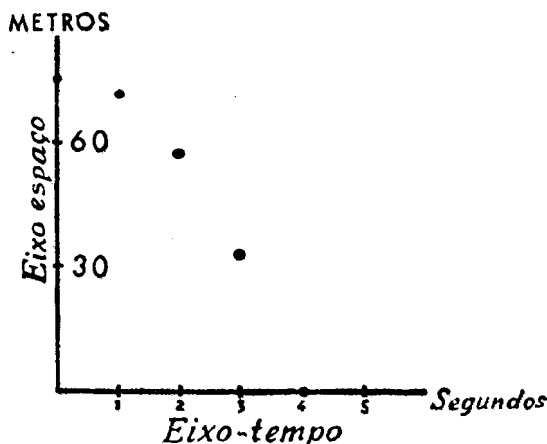
Mas isto não é física. Voltemos a ela. O movimento das partículas materiais tem que ser considerado. Para observar e predizer factos na Natureza, devemos considerar não somente o lugar, como também o tempo. Vamos a um exemplo muito simples:

Uma pedrinha, que pode ser considerada uma partícula, é lançada de uma torre de, suponhamos, 78,08 m ([1]) de altura. Desde o tempo de Galileu que estamos habilitados a predizer a coordenada da pedra num dado momento. Eis aqui o «horário» das posições da pedra depois de um, dois, três e quatro segundos.

| Tempo em segundos | Altura em metros |
|---|---|
| 0 | 78,08 |
| 1 | 73,20 |
| 2 | 58,56 |
| 3 | 34,16 |
| 4 | 0 |

([1]) Os números decimais em metros deste exemplo resultam de terem sido transformados para metros os valores em pés do original inglês.

Cinco factos são registados no nosso «horário», cada qual representado por dois números — as coordenadas de tempo e espaço de cada facto. O primeiro facto é o início da queda da pedra da altura de 78,08 m acima do chão, no tempo Zero. O segundo é a coincidência da pedra com a nossa barra (a torre), a 73,20 m acima do chão. Isto acontece após o primeiro segundo. O último facto é a coincidência da pedra com o chão.

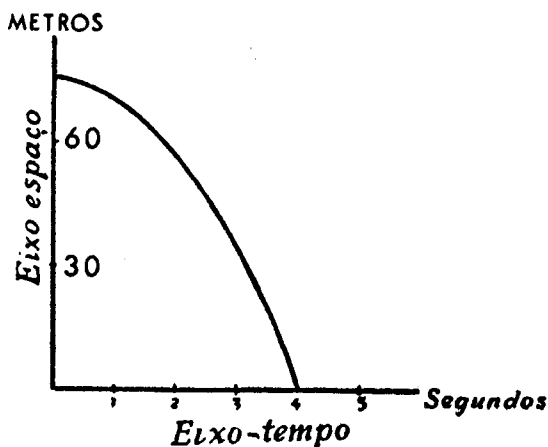
Podemos representar de modo diverso o conhecimento recolhido do nosso «horário». Podemos representar cinco pares de números no «horário» como pontos de uma superfície. Mas primeiro estabeleçamos uma escala. Um determinado segmento corresponderá a um pé ([1]) e outro corresponderá a um segundo. Por exemplo:

100 pés 30,5 — 1 segundo

Desenhamos então duas linhas perpendiculares, a que chamaremos, uma, eixo-tempo; e outra, eixo-espaço.

([1]) 0,305 m.

As distâncias entre os pontos e o eixo-espaço representam a coordenada de tempo, como está registada na primeira coluna do nosso «horário»; e as distâncias entre os pontos e o eixo-tempo representam as coordenadas de espaço.

Exactamente o mesmo fenómeno fica assim expresso de duas maneiras diversas, pelos pares de números ou pelos pontos no plano, podendo uma ser tirada da outra. A escolha entre as duas representações torna-se apenas matéria de gosto pessoal, pois são equivalentes.

Vamos dar mais um passo em frente. Imaginemos um melhor «horário», que dê as posições, não para cada segundo, mas, digamos, para cada centésimo de milésimo de segundo. Teremos então muitos pontos no nosso plano espaço-tempo. Por fim, se a posição é dada para cada instante, ou, como se diz em matemática, se a coordenada de espaço é dada em função de tempo, a nossa colecção de pontos torna-se uma linha contínua. O desenho imediato representa o movimento total, e não apenas fragmentos deste movimento como o anterior.

O movimento ao longo da barra (a torre), ou o movimento num espaço unidimensional, está aqui representado como

curva num contínuo de espaço-tempo bidimensional. A cada ponto no nosso contínuo de espaço-tempo corresponde um par de números, um dos quais marca a ordenada do tempo e o outro a ordenada do espaço. Inversamente: um ponto definido no nosso plano de espaço-tempo corresponde a cada par de números caracterizadores de um acontecimento. Dois pontos adjacentes representam dois factos, dois acontecimentos em lugares e em instantes levemente diversos.

Contra a nossa representação pode argumentar-se deste modo: não há muito senso em representar a unidade de tempo por meio de um segmento mecanicamente combinado com o espaço e formando o contínuo bidimensional de dois contínuos unidimensionais. Mas teria então de protestar-se contra todos os gráficos representativos da mudança de temperatura de Nova Iorque durante o último Verão, ou contra os gráficos representativos das mudanças do custo da vida durante os últimos anos, uma vez que o método empregado nos dois casos é o mesmo. Nos gráficos de temperatura o contínuo unidimensional da temperatura combina-se com o contínuo unidimensional do tempo para dar o contínuo bidimensional do tempo--temperatura.

Voltemos à partícula que cai da torre. O nosso gráfico do movimento é uma convenção útil, já que caracteriza a posição da partícula num dado instante. Conhecendo como as partículas se movem, gostaríamos de figurar mais uma vez o seu movimento, o que podemos conseguir de dois modos diferentes.

Figurámos a partícula que muda de posição no tempo, num espaço unidimensional. Figurámos o movimento como sequência de factos no contínuo unidimensional do espaço. Não misturámos espaço e tempo, usando uma representação *dinâmica* em que as posições *mudassem* com o tempo.

Mas podemos figurar o mesmo movimento de modo diverso. Podemos formar um quadro *estático*, considerando a curva do contínuo bidimensional de tempo-espaço. Nesse caso o movimento é representado como qualquer coisa que *é*, que

existe no contínuo bidimensional de espaço-tempo, e não como qualquer coisa que muda no contínuo unidimensional de espaço.

Ambas as representações são exactamente equivalentes; preferir uma ou outra fica sendo pura matéria de convenção e de gosto.

Nada do aqui dito quanto à representação do movimento tem algo que ver com a teoria da relatividade. Ambas as representações podem ser indistintamente usadas, embora a velha física favoreça a representação dinâmica do movimento como coisa que acontece no espaço e não como coisa existente no espaço-tempo. Mas a teoria da relatividade modifica este conceito; favorece a representação estática e encontra, na representação do movimento como qualquer coisa que existe no espaço-tempo, uma representação mais conveniente e mais objectiva da realidade. Temos ainda uma questão a atender: porque as duas representações, equivalentes do ponto de vista da física antiga, o não são do ponto de vista da relatividade?

A resposta será bem compreendida se dois SC em movimento uniforme em relação um ao outro forem novamente levados em conta.

De acordo com a física antiga, os observadores nos dois SC assinalarão para um mesmo facto diferentes coordenadas de espaço, mas a mesma coordenada de tempo. Assim, no nosso exemplo, a coincidência da partícula com o chão está caracterizada no nosso SC pela coordenada de tempo «4», e pela coordenada de espaço «zero». Segundo a velha mecânica, para um observador que se move uniformemente em relação a esse dado SC a pedra alcançará o chão quatro segundos depois. Mas este observador referirá a distância ao seu SC e ligará diferentes coordenadas de espaço com o facto da colisão, embora a coordenada de tempo seja a mesma para si e para todos os observadores em movimento uniforme. A física antiga só conhece um «absoluto» fluir de tempo para todos os observadores. Para cada SC o contínuo bidimensional pode ser

desdobrado em dois contínuos unidimensionais: espaço e tempo. Por causa do carácter «absoluto» de tempo, a transição do «estático» para o «dinâmico», na representação do movimento, tem na velha física uma significação objectiva.

Mas já nos convencemos de que a transformação clássica não deve ser usada na física. De um ponto de vista prático ela é útil para pequenas velocidades, mas não para o estabelecimento das questões físicas fundamentais.

Segundo a relatividade, o tempo da colisão de uma pedra com o solo não será o mesmo para todos os observadores. As coordenadas de tempo e espaço serão diferentes nos dois SC, e a mudança na coordenada de tempo será completamente distinta se a velocidade relativa se aproxima da da luz. O contínuo bidimensional não pode ser desdobrado nos dois contínuos unidimensionais da velha física. No determinar em outro SC as coordenadas de tempo-espaço, não podemos considerar em separado o espaço e o tempo. O desdobramento do contínuo bidimensional em dois contínuos unidimensionais, parece ser, do ponto de vista da relatividade, um processo arbitrário, sem significação objectiva.

Para o caso do movimento não restrito a uma linha recta, será simples generalizar tudo quanto dissemos. Realmente, não dois, mas quatro números devem ser usados para descrever os factos da Natureza. O nosso espaço físico, concebido por meio de objectos e movimentos desses objectos, tem três dimensões e posições caracterizadas por três números. O instante de um acontecimento é o quarto número. A cada acontecimento correspondem quatro números definidos. Portanto: o mundo dos acontecimentos forma um contínuo *quadridimensional*. Nada há de misterioso nisto, e é verdadeiro tanto para a velha física como para a teoria da relatividade. De novo a diferença se revela quando dois SC são considerados. A sala volante e os observadores de dentro e de fora determinam as coordenadas de espaço-tempo dos mesmos acontecimentos. De novo a velha física desdobra os contínuos quadridimensionais nos espaços

tridimensionais e no contínuo unidimensional de tempo. O velho físico preocupa-se apenas com a transformação do espaço, visto que o tempo é para ele absoluto. Acha natural o desdobramento em espaço e tempo do contínuo quadridimensional. Mas do ponto de vista da relatividade, o tempo, bem como o espaço, mudam na passagem de um SC para outro, e a transformação de Lorentz leva em consideração as propriedades da transformação do contínuo espaço-tempo do nosso mundo quadridimensional.

O mundo dos acontecimentos pode ser dinamicamente descrito por um quadro que muda no tempo e se projecta sobre o fundo tridimensional do espaço. Do ponto de vista da física velha as duas representações, a dinâmica e a estática, equivalem-se. Mas do ponto de vista da relatividade a representação estática é a mais conveniente e objectiva.

Também na teoria da relatividade podemos usar a representação dinâmica, se preferirmos. Mas temos de nos lembrar que esta divisão em tempo e espaço não tem significação objectiva, desde que o tempo já não é «absoluto». Nas páginas seguintes empregaremos a linguagem «dinâmica» e não a «estática», tendo sempre em mente as suas limitações.

## RELATIVIDADE GERAL

Há outro ponto a esclarecer. Uma das questões fundamentais ainda não foi bem resolvida: o sistema inercial existe? Aprendemos alguma coisa das leis naturais, a sua invariabilidade segundo a transformação de Lorentz, e a sua validade para todos os sistemas inerciais em movimento uniforme. Temos as leis, mas não conhecemos a estrutura a que elas se referem.

Para melhor enfrentar esta dificuldade, entrevistaremos o físico velho.

— Que é um sistema inercial?

— É um SC no qual as leis da mecânica são válidas. Um corpo no qual nenhuma força externa actua, move-se uniformemente em tal SC. Esta propriedade habilita-nos a distinguir um SC inércial de qualquer outro.

— Mas que quer dizer que «nenhuma força externa actua»?

— Quer dizer que o corpo se move uniformemente num SC inercial.

Aqui poderíamos propor mais uma questão: «Que é um SC inercial?» Mas como há poucas esperanças de obter resposta diferente da anterior, experimentaremos conseguir algo mais concreto com a modificação da pergunta.

— É enercial um SC rigidamente ligado à Terra?

— Não, porque as leis da mecânica não são rigorosamente válidas na Terra, visto que a Terra gira. Um SC rigidamente ligado ao Sol, pode, para muitos problemas, ser considerado inercial; mas quando consideramos o Sol em rotação, de novo percebemos que um SC ligado ao Sol não é rigorosamente inercial.

— Então que é, concretamente, esse SC inercial, e como pode ser determinado o seu estado de movimento?

— É meramente uma ficção útil, mas não tenho ideia de como se realiza. Se eu pudesse afastar todos os corpos materiais e libertar-me de todas as influências externas, o meu SC seria então inercial.

— Mas que quer dizer com um SC livre de todas as influências externas?

E novamente retornamos à questão do princípio!

A nossa entrevista mostra uma séria dificuldade da ciência clássica. Temos leis, mas não sabemos a que aplicá-las, de modo que toda a nossa estrutura física parece construída sobre areia.

Podemos abordar a dificuldade de um ponto de vista diferente. Experimentemos imaginar que no Universo só existe um corpo formando o nosso SC. Este corpo começa a girar. De acordo com a velha mecânica as leis da rotação de um corpo são diferentes das de um não-rotante. Se o princípio da

inércia é válido num caso, não o é no outro. Mas isto soa-nos muito suspeito. Será permitido considerarmos o movimento de um só corpo em todo o Universo? Pelo movimento de um corpo sempre significamos a sua mudança de posição em relação a outro corpo. Logo, fere o bom-senso falar do movimento de um só corpo. A mecânica velha e o bom-senso brigam neste ponto. A receita de Newton é: se o princípio da inércia é válido, então o SC está em movimento uniforme ou em repouso. Se o princípio da inércia não é válido, então o corpo está em movimento variado. Assim, o nosso veredicto de movimento ou repouso depende da aplicabilidade ou não das leis físicas a um dado SC.

Tomemos dois corpos, o Sol e a Terra, por exemplo. O movimento que observamos é *relativo*. Pode ser descrito pela ligação do SC a um corpo ou outro, ao Sol ou à Terra. Deste ponto de vista, o grande feito de Copérnico foi transferir o SC da Terra para o Sol. Mas, como o movimento é relativo e qualquer sistema de referência pode ser usado, não há razão para favorecer um SC de preferência a outro.

A física intervém e muda o nosso ponto de vista do bom-senso. O SC ligado ao Sol aproxima-se mais de um sistema inercial do que o ligado à Terra. As leis físicas podem melhor ser aplicadas a um SC de Copérnico do que a um de Ptolomeu. A grandeza da descoberta de Copérnico só do ponto de vista físico pode ser bem apreciada. Ilustra a grande vantagem de, na descrição do movimento dos planetas, usarmos um SC ligado ao Sol.

Na física velha nenhum movimento uniforme existe. Se dois SC estão em movimento uniforme, não tem sentido dizer: «Este SC está em repouso e o outro está em movimento.» Mas se os dois SC se movem não uniformemente, então há razão para dizer «este corpo move-se e o outro está em repouso (ou movendo-se uniformemente)». O movimento absoluto não tem significação aqui. Há neste ponto um abismo entre a ciência clássica e o bom-senso. As dificuldades mencionadas (sistema

inercial e movimento absoluto) ligam-se imediatamente entre si. O movimento absoluto mostra-se possível unicamente graças à ideia de um sistema inercial onde sejam válidas as leis da Natureza.

Pode parecer que não há saída para estas dificuldades, visto que nenhuma teoria física consegue evitá-las. O fluido do problema está na validade das leis da Natureza para apenas uma classe especial de SC, o inercial. A possibilidade de solvê-lo depende da resposta à seguinte questão: podemos formular leis físicas de modo que sejam válidas para todos os SC, não só para os que se movem uniformemente mas também para os que se movem arbitrariamente em relação um ao outro? Se isto é possível, as nossas dificuldades terão fim. Poderemos então aplicar as leis da Natureza a todos os SC, e a luta entre as ideias de Ptolomeu e as de Copérnico deixarão de ter motivo. Cada SC poderá ser usado com igual fundamento. As duas sentenças, «o Sol está em repouso e a Terra move-se» ou «o Sol move-se e a Terra está em repouso, significarão apenas duas convenções diferentes aplicadas a dois SC diferentes.

Será possível construir uma física relativista válida em cada SC, uma física na qual não haja lugar para o movimento absoluto? É!

Temos pelo menos uma indicação, embora fraca, de como construir a nova física. Na realidade a física relativista tem que aplicar-se a todos os SC, e portanto também ao caso especial do SC inercial. Já sabemos as leis deste SC inercial. A nova lei geral, válida para todos os SC, deve, no caso do sistema inercial, reduzir-se às velhas leis conhecidas.

O problema de formular leis físicas para cada SC foi resolvido pela chamada *teoria da relatividade geral*; a teoria primitiva que se aplicava unicamente aos sistemas inerciais é a chamada *teoria da relatividade restrita*. As duas teorias não podem contradizer-se, desde que devemos incluir as velhas leis da relatividade restrita nas leis gerais de um sistema inercial. Mas, do mesmo modo que o SC inercial foi outrora o único

para o qual as leis físicas se formularam, forma ele agora o caso especial limite, já que todos os SC que se movem arbitrariamente em relação uns aos outros são admissíveis.

Este é o programa da teoria da relatividade geral. Mas, traçando o caminho da sua realização, devemos ser ainda mais vagos. Novas dificuldades emergentes no desenvolver da ciência forçam a nossa teoria a tornar-se mais e mais abstracta. Imprevistas aventuras nos esperam. Mas o nosso alvo final é sempre a melhor compreensão da realidade. Elas juntam-se à cadeia lógica que liga teoria e observação. Para clarear o caminho que vai da teoria à experiência, para limpá-lo de desnecessárias suposições, para abarcar o maior número de factos, temos de dilatar mais e mais a cadeia. A mais simples e fundamental das nossas suposições torna-se a mais intrincada na nossa técnica de raciocínio matemático; o caminho da teoria à observação torna-se mais longo, mais subtil, e mais complicado. Conquanto pareça paradoxal, podemos dizer: a física moderna é mais simples que a antiga e parece, por isso, mais difícil e intrincada. Quanto mais simples for a nossa figuração do mundo externo e quantos mais factos abarque, mais fortemente reflectirá no nosso espírito a harmonia do Universo.

A nossa ideia é simples: construir uma física válida para todos os SC. A tarefa determina complicações formais e força-nos ao emprego de instrumentos matemáticos diversos dos até aqui em uso na física. Mostraremos apenas a ligação entre a realização deste programa e dois altos problemas: a gravitação e a geometria.

## DENTRO E FORA DO ELEVADOR

A lei da inércia marca o primeiro grande avanço da física; é na realidade o seu começo. Foi apreendida pela contemplação de uma experiência idealizada — um corpo em perpétuo movimento, sem nenhum atrito, nem nenhuma força externa

actuando nele. Este exemplo, como tantos outros, mostra-nos a importância das experiências idealizadas. Vamos ver uma que, embora fantástica, muito nos ajuda a compreender a relatividade.

Já analisámos a experiência da sala volante. Vamos agora ver um elevador que cai.

Imagine-se um grande elevador parado no topo de um arranha-céu muito mais alto do que todos os existentes. Subitamente o cabo de suporte quebra-se e o elevador despenha-se. Dentro vão observadores que fazem experiências durante a queda. Nas condições ideais imaginadas, eliminamos o atrito e a resistência do ar. Um dos observadores tira do bolso o lenço e o relógio, e deixa-os cair. Que acontece aos dois corpos? Para um observador que esteja de fora, olhando pela janela do elevador, o lenço e o relógio caem exactamente do mesmo modo, com a mesma aceleração. Tenhamos em vista, como já vimos, que a aceleração de um corpo que cai é independente da sua massa, facto que revelou a igualdade das massas de gravitação e de inércia (pág. 40). Recordaremos também que a igualdade das duas massas, a de gravitação e a de inércia, era, do ponto de vista da velha mecânica, completamente acidental e não representava qualquer papel na sua estrutura. Aqui, entretanto, esta igualdade reflectida na igual aceleração de todos os corpos que caem é essencial e constitui a base da nossa argumentação.

Voltemos ao lenço e ao relógio. Para o observador de fora ambos caem com a mesma aceleração. Mas o mesmo se dá com o elevador, com as suas paredes, o seu tecto, o seu soalho. Donde: a distância entre os dois corpos e o soalho não muda. Para o observador de dentro, os dois corpos, o relógio e o lenço, permanecem exactamente no ponto em que estavam quando ele os largou. Esse observador pode ignorar o campo gravitacional, desde que o mesmo se origina fora do seu SC. Ele verifica que dentro do elevador nenhuma força actua sobre os dois corpos, de modo que ficam ambos parados exactamente

como se estivessem num SC inercial. Estranhas coisas acontecem nesse elevador! Se o observador impele um corpo numa direcção, para baixo ou para cima, esse corpo move-se uniformemente até colidir com o tecto ou o soalho. Em suma: as leis clássicas da mecânica são válidas para o observador de dentro. Todos os corpos se comportam de acordo com a lei da inércia. O nosso novo SC rigidamente ligado com o elevador em queda livre difere do SC inercial num ponto. No SC inercial um corpo em movimento no qual nenhuma força actua move-se uniformemente e sempre. O SC inercial da velha física não tem limites nem no espaço nem no tempo. Mas, para o nosso observador de dentro do elevador, o caso já é diferente. O carácter inercial do seu SC é limitado em espaço e tempo. Mais cedo ou mais tarde, o corpo que ele impeliu colidirá com o tecto ou o soalho, perdendo o seu movimento uniforme. Mais cedo ou mais tarde, o próprio elevador colidirá com a terra, destruindo tanto os observadores como as suas experiências. O SC não passa de «edição de bolso» de um verdadeiro SC inercial.

Este carácter local do SC é em absoluto essencial. Se o nosso elevador imaginário possuísse o comprimento do Pólo Norte ao equador, com o lenço colocado sobre o Pólo Norte e o relógio sobre o equador, nesse caso os dois corpos não teriam para o observador de fora a mesma aceleração; o nosso argumento falharia! As dimensões do elevador devem ser limitadas de modo que a igualdade da aceleração de todos os corpos em relação ao observador externo possa ser admitida.

Com esta restrição, o SC assume carácter inercial para o observador interno. Podemos, pelo menos, indicar um SC para o qual todas as leis físicas são válidas, ainda que limitadas em espaço e tempo. Se imaginarmos outro SC, outro elevador em movimento uniforme relativamente ao que cai livremente, então esses dois SC serão localmente inerciais. Todas as leis serão em ambos exactamente as mesmas. A transição de um para outro será dada pela transformação de Lorentz.

Vejamos de que modo os dois observadores descrevem o que se passa.

O de fora observa o movimento do elevador e de todos os corpos dentro dele, e acha que agem de acordo com a lei da gravitação de Newton. Para esse observador, o movimento não é uniforme, mas acelerado, por causa da acção do campo gravitacional da Terra.

Apesar disso, uma geração de sábios nascidos e criados dentro do elevador raciocinaria de modo totalmente diverso. Julgar-se-iam na posse de um sistema inercial, e refeririam ao elevador todas as leis da Natureza. Ser-lhes-ia natural admitir o elevador em repouso como um SC inercial.

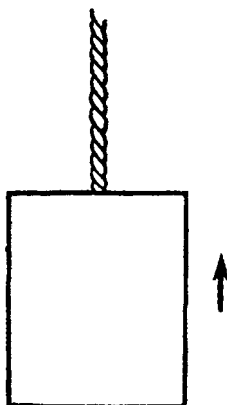
Seria impossível conciliar as diferenças entre o observador de fora e o de dentro. Cada qual firmar-se-ia no seu direito de tudo referir ao seu SC. As descrições dos factos feitas por ambos seriam igualmente certas.

Com este exemplo verificamos que é possível uma sólida descrição dos fenómenos físicos em dois SC diferentes, ainda que não se movam uniformemente em relação um ao outro. Mas para tal devemos levar em conta a gravitação, construindo, por assim dizer, uma «ponte» para a transição de um SC para outro. O campo gravitacional existe para o observador de fora; não existe para o de dentro. O movimento acelerado do elevador no campo gravitacional existe para o de fora; para o de dentro o que existe é repouso e ausência de campo gravitacional. Mas a «ponte» do campo gravitacional, tornando possível a descrição nos dois SC, repousa num pilar muito importante: a equivalência entre a massa de gravitação e a de inércia. Sem esta pista, que não foi suspeitada pela mecânica antiga, os nossos argumentos de hoje falhariam completamente.

Ainda outra experiência idealizada. Admitamos que há um SC no qual a lei da inércia é válida. Já descrevemos o que acontece a um elevador em repouso em tal SC inercial. Mas vamos agora variar as condições. Alguém de fora atou um

cabo ao elevador e está a puxá-lo com força constante na direcção indicada no desenho.

Uma vez que são válidas neste SC as leis da mecânica, o elevador move-se com aceleração constante na direcção do movimento. Vamos ver o que dizem os dois observadores.

*Observador externo:* O meu SC é inercial. O elevador move-se com aceleração constante em consequência da força constante que nele actua. Os observadores internos estão em movimento absoluto, porque para eles as leis da mecânica não

valem. Não percebem que estão em repouso os corpos nos quais forças não actuam. Se um corpo é largado lá dentro colide logo com o chão, porque o chão move-se para cima ao encontro do corpo. E isto acontece tanto para um lenço como para um relógio. A mim parece-me muito estranho que o observador interno deva estar sempre em contacto com o chão, porque se ele pula, imediatamente o chão o alcança novamente.

*Observador interno:* Não vejo razão para crer que o meu elevador esteja em movimento absoluto. Concordo que o SC rigidamente ligado ao meu elevador não é realmente inercial, mas não creio que tenha algo que ver com o movimento abso-

luto. O meu relógio e o meu lenço caem porque o elevador em conjunto é um campo gravitacional. Apercebo-me exactamente do que na terra um homem se apercebe em matéria de movimentos. Esse homem explica-os da maneira mais simples pela acção da gravidade. O mesmo acontece comigo.

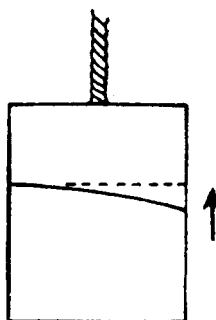
Estas duas descrições, do observador externo e do interno, são perfeitamente sólidas e não há a dizer que uma seja mais que outra. Para a descrição dos fenómenos do elevador podemos aceitar uma ou outra: ou o movimento não uniforme e a ausência de um campo gravitacional para o observador de fora, ou o repouso e a presença de um campo gravitacional para o de dentro.

O de fora pode admitir que o elevador está em movimento não uniforme «absoluto». Mas um movimento que é eliminado pela admissão de um campo gravitacional actuante não pode ser visto como absoluto.

Talvez haja um meio de sair da ambiguidade destas duas descrições diferentes e uma escolha em favor de uma delas possa ser feita. Imaginemos que um raio de luz entra no elevador pela janela e alcança a parede oposta. Vamos ver como essa marcha da luz, da janela à parede, pode ser predita pelos dois observadores.

O *observador externo*, acreditando no movimento acelerado do elevador, poderia afirmar: o raio de luz entra pela janela e move-se horizontalmente, em linha recta e com a velocidade constante, rumo à parede. Mas o elevador está em movimento para cima, de modo que durante o tempo em que a luz caminhou até à parede o elevador já não se encontra na mesma posição. Por esse motivo o raio de luz não tocará no ponto da parede exactamente oposto ao seu ponto de entrada pela janela, mas um pouco abaixo. Será muito pequena a diferença mas será diferença, e o raio de luz caminhará, não em linha recta, mas em linha levemente curva. A diferença é devida à distância que o elevador subiu durante a ida do raio de luz da janela à parede.

O *observador interno*, o qual admite o campo gravitacional a agir em todos os objectos do seu elevador: não há movimento acelerado do elevador, mas somente a acção de um campo gravitacional. Um raio de luz não tem peso e por isso não é afectado pela gravitação. Se for lançado em linha horizontal, esse raio alcançará a parede no ponto exactamente oposto ao de entrada.

Parece da discussão que há possibilidade de decidir entre estes dois pontos de vista contrários, já que o fenómeno seria diferente para os dois observadores. Se nada há de ilógico nas

duas suposições citadas, então a nossa argumentação está destruída e não podemos descrever todos os fenómenos de duas maneiras igualmente sólidas, uma com, e outra sem campo gravitacional.

Mas há felizmente uma grave falha no raciocínio do observador interno, que nos vem salvar a argumentação. Diz ele: «Um raio de luz não tem peso e por isso não pode ser afectado pela gravidade.» Não está certo! Um raio de luz tem energia, e a energia tem massa. Ora, cada massa inercial é atraída pelo campo gravitacional, porque as massas inerciais e as gravitacionais equivalem-se. Um raio de luz encurva-se num campo gravitacional do mesmo modo que um corpo horizontalmente

projectado com a velocidade da luz. Se o observador interno houvesse raciocinado melhor e levado em conta a curvatura da luz num campo gravitacional, os seus resultados seriam exactamente os mesmos que os do observador externo.

O campo gravitacional da Terra é, sem dúvida, muito fraco para encurvar os raios de luz de modo que tal possamos provar pela experiência directa. Mas as famosas experiências realizadas durante os eclipses solares mostram conclusivamente, embora indirectamente, a influência de um campo gravitacional na marcha de um raio de luz.

Destes exemplos segue-se que há fundadas esperanças de formular uma física relativista. Mas para isso temos primeiramente de atacar o problema da gravitação.

Com o exemplo do elevador vimos a solidez das duas descrições. O movimento não uniforme pode ou não pode ser admitido. Com o campo gravitacional dos nossos exemplos podemos eliminar o movimento «absoluto». Mas então não há nada absoluto no movimento não uniforme. O campo gravitacional elimina-o completamente.

Os espectros do movimento absoluto e do SC inercial têm que ser expulsos da ciência — e a física da relatividade surge. As nossas experiências idealizadas mostram como o problema geral da relatividade está intimamente ligado ao da gravitação, e como a equivalência entre a massa gravitacional e a inercial é básica para esta ligação. Claro que na relatividade a solução do problema gravitacional deve diferir da solução de Newton. As leis da gravitação têm que ser, como todas as leis da Natureza, formuladas para todos os SC possíveis. As leis da mecânica como Newton as concebeu só são válidas no SC inerte.

## GEOMETRIA E EXPERIÊNCIA

O nosso próximo exemplo ainda será mais fantástico que o do elevador que cai. Temos de abordar um novo problema, o da ligação entre a geometria e a relatividade, e vamos come-

çar com a descrição de um mundo em que só vivem criaturas de duas dimensões, não de três, como no nosso. O cinema familiarizou-nos com criaturas bidimensionais, que agem numa tela bidimensional. Imaginemos que essas figuras da tela realmente existem e têm o poder de pensar e criar a sua própria ciência; imaginemos que, para elas, o espaço geométrico é a tela de duas dimensões. Estas criaturas são incapazes de imaginar de um modo concreto um espaço tridimensional, justamente como nós o somos de imaginar um mundo de quatro dimensões. Elas podem deflectir uma linha recta; sabem o que é o círculo mas não podem construir a esfera, porque seria abandonar o espaço de duas dimensões em que vivem. Nós estamos na mesma situação. Podemos deflectir e curvar linhas c superfícies, mas dificilmente nos figuramos um espaço deflectido e curvo de três dimensões.

Vivendo, pensando e experimentando, aquelas sombras poderiam eventualmente dominar o conhecimento da geometria euclidiana bidimensional. Poderiam, por exemplo, provar que a soma dos ângulos de um triângulo é de cento e oitenta graus, ou construir dois círculos de centro comum, um maior, outro menor. Poderiam descobrir que a relação entre a circunferência de dois círculos é igual à relação entre os seus raios, outro resultado característico da geometria euclidiana. Se a tela fosse infinitamente grande, essas criaturas de sombra também poderiam admitir que, uma vez saídas numa viagem, jamais retornariam ao ponto de partida.

Imaginemo-las agora a viver em condições diferentes. Imaginemos que alguém de fora (alguém do mundo de três dimensões), as transpõe da tela para a superfície de uma esfera de raio excessivamente grande. Se essas sombras forem muito pequenas em relação à total superfície da esfera, e se não possuírem meios de vencer as distâncias, não se aperceberão da mudança. A soma dos ângulos em pequenos triângulos continuará sendo de cento e oitenta graus. Dois pequenos círculos de centro comum ainda revelarão a mesma proporção entre os

raios e as circunferências. Uma viagem em linha recta nunca as reconduzirá ao ponto de partida.

Mas deixemos que tais criaturas de sombra, no decorrer do tempo, desenvolvam os seus conhecimentos teóricos e técnicos. Deixemo-las descobrirem meios de vencer a distância. Nesse caso, fatalmente descobrirão que se partirem numa viagem sempre em linha recta terão de voltar ao ponto de partida. «Em linha recta» significa ao longo do grande círculo da esfera. Também descobrirão que a relação de dois círculos de centro comum não é igual à relação dos raios, se um dos raios é pequeno e o outro grande.

Admitindo-se que essas criaturas de sombra sejam conservadoras e por muitas gerações se tenham educado na geometria euclidiana, certamente que se empenharão em manter essa geometria, a despeito da evidência dos factos novos. Podem fazer que a física suporte a carga das discrepâncias. Podem procurar razões físicas, como, por exemplo, diferenças de temperatura, para a deformação de linhas e os desvios da geometria euclidiana. Cedo ou tarde, porém, descobrirão que há um meio muito mais lógico e convincente de descrever essas ocorrências. Eventualmente convencer-se-ão de que o mundo em que vivem é finito e baseado em leis e princípios geométricos diferentes dos admitidos. Compreenderão que, a despeito da sua incapacidade para imaginá-lo, o mundo em que vivem é a superfície a duas dimensões de uma esfera. E breve construirão novos princípios de geometria, os quais, embora diferindo dos de Euclides, podem ser formulados de maneira igualmente lógica para o seu mundo de duas dimensões. Para uma nova geração educada no conhecimento da geometria da esfera, a velha geometria euclidiana parecerá mais complicada e artificial, já que não se adapta aos factos observados.

Voltemos agora às criaturas do nosso mundo a três dimensões.

Que significa dizer que o nosso espaço tridimensional tem um carácter euclidiano? Significa que todas as suposições ló-

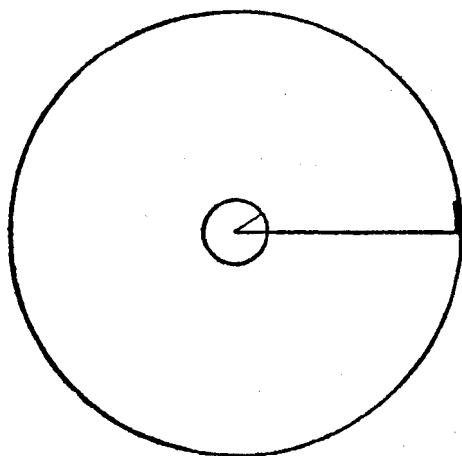
gicas da geometria de Euclides podem ser confirmadas pela experiência. Com o auxílio de corpos rígidos, ou raios de luz, podemos construir objectos correspondentes aos objectos idealizados da geometria euclidiana. A borda de uma régua ou de um raio de luz corresponde à linha; a soma dos ângulos de um triângulo construído de finas varetas rígidas é de cento e oitenta graus; a relação entre os raios de dois círculos de centro comum, construídos de arame, é igual à das suas circunferências. Interpretada desta maneira, a geometria de Euclides torna-se um capítulo da física.

Mas podemos imaginar que foram descobertas certas discrepâncias, como, por exemplo, que a soma dos ângulos de um grande triângulo construído de madeira e «considerado» rígido não é de cento e oitenta graus. Desde que já estamos afeitos à ideia da representação concreta dos objectos da geometria euclidiana por meio de corpos rígidos, é provável que procuremos atribuir a qualquer força física o inesperado mau comportamento desses corpos. Procuraremos descobrir a natureza física dessa força e a sua influência sobre outros fenómenos. Para salvar a geometria euclidiana acusaremos os objectos de não serem rígidos, de não corresponderem exactamente aos objectos por ela idealizados. E procuraremos encontrar uma melhor representação de corpos que a ela se conformem. Mas se não conseguirmos essa conciliação, teremos de abandonar a nossa ideia euclidiana de espaço e formular outra.

A necessidade que hoje sentimos é ilustrada por uma experiência reveladora de que a física relativista não pode assentar na geometria euclidiana. O nosso argumento implicará resultados já obtidos a respeito do SC inercial e da teoria especial da relatividade.

Imagine-se um grande disco e nele desenhemos dois círculos de centro comum, um muito grande, outro muito pequeno. O disco gira com rapidez em relação a um observador de fora. Temos também um observador no disco. Suponhamos que o SC do observador de fora é inercial. Esse observador pode desenhar

no seu SC inercial os mesmos dois círculos, grande e pequeno, que temos no disco rotante, e fazer que coincidam. A geometria de Euclides é válida no SC desse observador, já que é um SC inercial, de modo que para ele a relação das circunferências é igual à dos raios.

Mas... e para o observador do disco? Do ponto de vista clássico e também da relatividade especial, o seu SC está proibido. Mas se o nosso intento é procurar leis físicas válidas em

todos os SC, então temos de tratar os dois observadores com igual respeito. Nós, cá de fora, estamos a atentar no observador de dentro do disco, empenhado em encontrar, por medida, a circunferência e o raio do disco rotante. Esse observador emprega a mesma régua métrica usada pelo observador de fora. A «mesma» não significa realmente a mesma, isto é, entregue pelo observador de fora ao de dentro, ou, que a régua métrica tenha o mesmo comprimento quando colocada em cada SC.

O observador de dentro começa pela medição do raio e da circunferência do círculo pequeno. O resultado que obtém deve ser o obtido pelo observador externo. O eixo sobre o qual

o disco roda passa pelo centro do círculo. As partes do disco mais próximas do centro têm velocidade muito pequena. Se o círculo é bastante pequeno, podemos com segurança aplicar a velha mecânica e ignorar a teoria da relatividade restrita. Isto significa que a régua métrica tem a mesma extensão, tanto para o observador de fora como para o de dentro, e que o resultado das duas medições será o mesmo para ambos. Em seguida o observador de dentro mede o raio do círculo grande. Colocada sobre o raio, a régua métrica move-se para o observador de fora. Essa régua, entretanto, não se contrai, e terá a mesma extensão para os dois observadores, desde que a direcção do movimento lhe é perpendicular. Temos, pois, para ambos os observadores, três medições equivalentes: dois raios e a pequena circunferência. Mas o mesmo não se dará com a quarta medição! O comprimento da circunferência grande será diferente para os dois observadores. A régua colocada sobre a circunferência na direcção do movimento aparecerá contraída para o observador de fora, se ele a comparar à sua régua em repouso. A velocidade é muito maior do que no círculo interno e essa contracção tem que ser levada em conta. Se, então, aplicarmos os resultados da relatividade restrita, a nossa conclusão será esta: o comprimento da grande circunferência variará se for medido pelos dois observadores. Desde que das quatro medidas feitas pelos observadores uma só não é idêntica para ambos, a relação dos dois raios não pode, para o observador de dentro, ser o observador de fora. Isto quer dizer que o observador de um disco não pode confirmar a validade da geometria euclidiana no seu SC.

Obtido este resultado, o observador de dentro poderá alegar que não leva em consideração um SC em que a geometria euclidiana não é válida. Mas, arguindo desse modo, ele rejeita a ideia principal da teoria da relatividade geral. Por outro lado, se desejamos repudiar o movimento absoluto, então a física deve basear-se numa geometria mais geral que a antiga. Não

podemos fugir a esta conclusão, se admitirmos que todos os SC são permissíveis.

As mudanças trazidas pela relatividade geral confinam-se apenas ao espaço. Na relatividade restrita vimos em cada SC relógios em repouso que tinham o mesmo ritmo e mostravam simultaneamente o mesmo tempo. Que sucede a um relógio num SC não inercial? A experiência com o disco pode novamente ser utilizada. O observador de fora tem no seu SC vários relógios, e coloca-os, um no pequeno círculo interno e outro no grande círculo externo. O relógio do círculo interno tem pequena velocidade relativamente ao observador de fora. Podemos, por isso, concluir que o ritmo desse relógio será o mesmo do relógio de fora. Mas o relógio do círculo grande revela considerável velocidade, mudando de ritmo em relação aos relógios do observador de fora, e, portanto, também em relação aos relógios colocados no círculo pequeno. Assim, os dois relógios rotantes terão diferentes ritmos, e, aplicados os princípios da relatividade restrita, vemos de novo que, no nosso SC rotante, não podemos estabelecer leis similares aos de um SC inercial.

Para tornar claras as conclusões a extrair destas experiências, tracemos o possível diálogo entre A e M, isto é, entre o físico antigo e o moderno. A, é o observador de fora no SC inercial e M, o observador de dentro do disco rotante.

A: No vosso SC a geometria de Euclides não é válida. Acompanhei as vossas medições e admito que a relação entre duas circunferências não é, no vosso SC, igual à relação entre os dois raios. Mas isto mostra que o vosso SC é um SC proibido. O meu SC, entretanto, é de carácter inercial, e nele posso aplicar com segurança a geometria euclidiana. O vosso disco está em movimento absoluto, e de acordo com a velha física forma um SC proibido, no qual as leis da mecânica não são válidas.

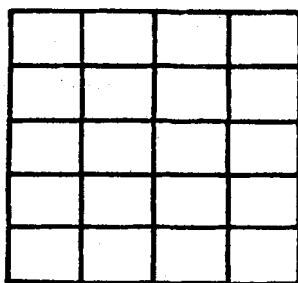
M: Não quero ouvir falar de movimento absoluto. O meu SC é tão bom como o vosso. O que observei foi a vossa rotação

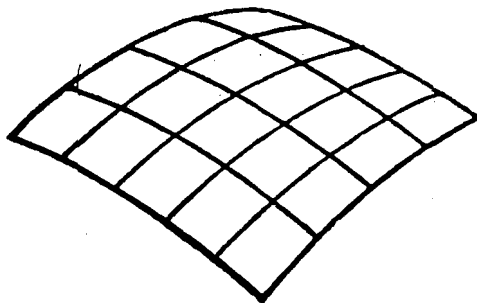
relativa ao meu disco. Ninguém me pode proibir de relacionar todos os movimentos com o meu disco.

A: Mas não sentiu uma estranha força a procurar afastá-lo do centro do disco? Se o disco não estivesse em rotação, as duas coisas que observou não aconteceriam. Não se teria apercebido da força que o impele para fora, nem que a geometria euclidiana não é aplicável ao vosso SC. Não basta isto para convencê-lo de que o vosso SC está em movimento absoluto?

M: De modo nenhum! Observei os dois factos que mencionou, mas admito um campo gravitacional estranho que age no meu disco e é o responsável por ambos. O campo gravitacional, dirigido para fora do disco, deforma as minhas barras rígidas e muda o ritmo dos meus relógios. Aceitando qualquer SC, devo ao mesmo tempo admitir a existência de um campo gravitacional apropriado, com a sua influência sobre as barras e os relógios.

A: Mas estareis bem consciente das dificuldades criadas pela sua teoria da relatividade geral? Gostaria de esclarecer o que digo com um exemplo não físico. Imaginemos uma cidade americana de ruas paralelas, com avenidas paralelas e perpendiculares a essas ruas. A distância entre as ruas e as avenidas é sempre a mesma, e os blocos de casas são do mesmo tamanho. Sendo assim, posso facilmente caracterizar a posição de cada bloco. Mas essa construção seria impossível sem a geometria euclidiana. Assim, por exemplo, não podemos cobrir a Terra inteira com uma cidade americana. Um olhar para o globo o provará. Nem, igualmente, poderíamos cobrir com ela o seu disco. Diria você que as suas barras estão deformadas pelo campo gravitacional. O facto de não poder confirmar o teorema de Euclides sobre a igualdade de relação das circunferências e dos raios, mostra com clareza que se você construísse sobre o disco essa cidade que imaginamos, cedo ou tarde encontraria dificuldades e por fim a impossibilidade. A sua geometria no disco rotante assemelha-se à de uma superfície curva, onde, sem dúvida, a construção de ruas e avenidas é

impossível numa parte bastante grande da superfície. Se quiser um exemplo um pouco mais físico, tome um plano irregularmente aquecido, com diferentes temperaturas em diferentes partes da superfície. Poderia, com pequenas varas de ferro que

se expandem com a temperatura, traçar a construção «paralelo-perpendicular» que imaginamos? Sem dúvida que não! O seu «campo gravítico» actua sobre as barras, do mesmo modo que a mudança de temperatura sobre as varetas de ferro.

M: Nada disso me amedronta. A construção de ruas e

avenidas foi sugerida para determinar as posições dos pontos com relógios para marcar os factos. A cidade de ruas e avenidas não necessita ser americana, pode ser europeia. Vejamo-la feita, por exemplo, de plasticina e deformada. Poderemos igualmente

numerar os blocos e reconhecer as ruas e avenidas, embora já não sejam rectas e equidistantes. Semelhantemente no nosso globo a longitude e a latitude dão a posição de pontos, embora o Globo não seja como uma «cidade americana».

A: Mas ainda vejo uma dificuldade. Você é forçado a usar a sua «estrutura de cidade europeia». Concordo que pode fixar pontos e eventos, mas essa construção atrapalhará todas as medidas de distância. Não lhe dará as *propriedades métricas* do espaço como eu as tenho na minha construção. Exemplo: sei, na minha cidade americana, que para caminhar dez blocos tenho de cobrir duas vezes a distância de cinco blocos. Como todos os blocos são iguais, posso imediatamente determinar distâncias.

M: É verdade. Na minha «estrutura europeia» não posso medir imediatamente as distâncias pelo número de blocos deformados. Devo conhecer algo mais; devo conhecer as propriedades geométricas da minha superfície. Exactamente como todos sabem que de 0° a 10° de longitude no equador não há a mesma distância que entre 0° a 10° de longitude perto do Pólo Norte. Mas cada navegador sabe como julgar a distância entre dois pontos da Terra, em virtude de conhecer as propriedades geométricas da Terra. Pode, por cálculos de trigonometria esférica ou experimentalmente, levar com a mesma velocidade o seu navio através das duas distâncias. No seu exemplo o problema é trivial, porque todas as ruas e avenidas estão separadas pela mesma distância. No caso da Terra já é mais complicado; os dois meridianos 0° e 10° encontram-se no pólo e atingem o afastamento máximo no equador. Semelhantemente, para bem determinar as distâncias na minha «estrutura europeia», devo conhecer alguma coisa mais do que você na sua «estrutura americana». Posso adquirir este conhecimento adicional pelo estudo das propriedades geométricas do meu contínuo em cada caso particular.

A: Mas tudo isso só serve para mostrar o complicado e o inconveniente de abandonar a estrutura simples da geometria

euclidiana pela coisa intrincada que será compelido a usar. Acha que seja necessário?

M: Receio bem que sim, no caso de eu querer aplicar a física a qualquer SC sem me basear no misterioso SC inercial. Concordo que o meu instrumento matemático é mais complexo que o seu, mas as minhas suposições físicas são mais simples e naturais.

A discussão ficou restrita ao contínuo bidimensional. Na teoria da relatividade geral o ponto em causa ainda é mais complicado, já que em vez de duas dimensões temos de considerar um contínuo de quatro. Mas as ideias são as esboçadas para o caso de duas dimensões. Não podemos usar na relatividade geral, como o fazemos na restrita, o jogo mecânico das barras paralelas e perpendiculares, e dos relógios sincronizados. Num SC arbitrário, não podemos, por meio do uso das barras e dos relógios sincronizados, determinar o ponto e o instante em que algo sucede, como fazemos no SC inercial da relatividade restrita. Podemos ordenar os factos com as nossas barras não euclidianas e os nossos relógios fora de ritmo. Mas medições reais, requerendo barras rígidas e perfeitos relógios sincronizados, só são possíveis no SC inercial e local. Aqui a relatividade restrita é válida; mas o nosso «bom» SC é unicamente local, pois o seu carácter inercial é limitado em espaço e tempo. No nosso SC arbitrário ainda podemos prever o resultado das medidas feitas no SC inercial local. Mas para isso precisamos conhecer o carácter geométrico do nosso contínuo de espaço-tempo.

As nossas experiências idealizadas indicam apenas o carácter geral da nova física relativista. Mostram que o nosso problema fundamental é o da gravitação. Mostram-nos também que a relatividade geral nos leva a maior generalização dos conceitos de espaço e tempo.

## RELATIVIDADE GERAL E SUA VERIFICAÇÃO

.. A teoria da relatividade geral tenta formular leis físicas para todos os SC. O problema fundamental dessa teoria é a gravitação. A partir de Newton, só agora com a teoria da relatividade se faz um sério esforço para reformular a lei da gravitação. Será necessário? Já vimos os resultados da lei de Newton, e os grandes desenvolvimentos que em virtude desta lei teve a astronomia. Essa lei de Newton ainda permanece a base de todos os cálculos astronómicos. Mas também vimos algumas objecções que contra ela se levantam. A lei de Newton só é válida no SC inercial da velha física, num SC definido pelas condições em que as leis da mecânica sejam operantes. A força entre duas massas depende da distância entre ambas. A ligação entre força distância é, como sabemos, uma invariante na transformação clássica. Mas essa lei não se enquadra na estrutura da relatividade restrita, porque, na transformação de Lorentz, a distância não é uma invariante. Como fizemos com as leis do movimento, poderíamos generalizar a lei da gravidade, adaptá-la à relatividade restrita, ou, por outras palavras, formulá-la de modo que seja invariante para a transformação de Lorentz e não para a clássica. Mas a lei da gravitação de Newton opõe-se obstinadamente a todos os esforços de simplificação e adaptação ao esquema da relatividade restrita. E ainda que o conseguíssemos, um passo ainda seria necessário: o passo do SC inercial da relatividade restrita para o SC arbitrário da relatividade geral. Por outro lado, a experiência do elevador em queda mostra claramente que não há meio de formular a teoria da relatividade geral sem resolver primeiramente o problema da gravitação. Dos nossos argumentos se vê claramente que a solução do problema da gravitação diferirá na física antiga e na relatividade geral.

Experimentemos indicar o caminho que leva à relatividade geral, apontando as razões que nos forçam a mais uma vez

mudar os nossos velhos pontos de vista. Sem penetrarmos na estrutura formal da teoria gravitacional comparada com a antiga. Não será difícil apreender a natureza das diferenças em vista do que foi dito.

1. As equações gravitacionais da relatividade geral podem ser aplicadas a qualquer SC. Tornar-se-á apenas matéria de conveniência a escolha de um SC particular num caso especial. Teoricamente todos os SC são admissíveis. Ignorando a gravitação, automaticamente retornamos ao SC inercial da relatividade restrita.

2. A lei de Newton, estabelece relações entre o movimento de um corpo, aqui e agora, e a acção de um corpo no mesmo tempo e a distância. Esta é a lei que formou o molde para o conjunto da nossa concepção mecanicista. Mas esta concepção faliu. Nas equações de Maxwell vimos um novo molde para as leis da Natureza. Essas equações são leis estruturais. Ligam eventos que acontecem agora e aqui com eventos que acontecerão um pouco mais tarde na imediata vizinhança. São leis que descrevem as mudanças do campo electromagnético. As nossas equações gravitacionais são também leis de estrutura que descrevem as mudanças do campo gravitacional. Esquematicamente falando, podemos dizer: a transição da lei gravitacional de Newton para a relatividade geral assemelha-se em alguma coisa à transição da teoria dos fluidos eléctricos com a lei de Coulomb, para a teoria de Maxwell.

3. O nosso mundo não é euclidiano. A natureza geométrica do Globo é feita de massas e suas velocidades. As equações gravitacionais da relatividade geral procuram apreender as propriedades geométricas do nosso Universo.

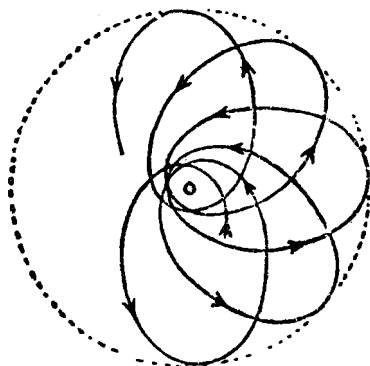
Suponhamos, de momento, que o programa da relatividade geral tenha sido realizado. Não haverá perigo de levarmos a especulação muito longe da realidade? Sabemos que a velha teoria explica muito bem as observações astronómicas. Será possível estabelecer uma ponte entre a nova teoria e a observação? Cada especulação deve ser tratada pela experiência, e

qualquer resultado, por mais atractivo que seja, tem que ser rejeitado quando não concorda com os factos. Como suporta a nova teoria da gravitação esta prova de experiência? Esta pergunta pode ser respondida assim: a velha teoria constitui um caso especial limite da nova teoria. Se as forças gravitacionais forem relativamente fracas, a velha lei de Newton constituirá uma boa aproximação das novas leis da gravitação. Assim, todos os observadores que apoiam a teoria clássica apoiarão também a relatividade geral. Do alto da nova teoria recuperaremos a velha.

Ainda qe nenhuma observação adicional possa ser citada em favor da nova teoria, se a sua explanação fosse tão boa como a da antiga deveríamos propender para a nova, se houvesse uma escolha livre. Do ponto de vista formal as equações da nova teoria são mais complicadas, mas do ponto de vista dos princípios fundamentais as suas suposições são muito mais simples. Os dois velhos espectros, tempo absoluto e sistema inercial, desaparecem. A pista da equivalência da massa gravitacional e inercial não permanece oculta. Nenhuma suposição a propósito das forças gravitacionais e sua dependência da distância se torna necessária. As equações gravitacionais têm a forma de leis de estrutura — a forma requerida a todas as leis físicas depois da grande descoberta da teoria de campo.

Algumas novas deduções não contidas na lei de Newton podem ser tiradas das novas leis gravitacionais. Uma, a curvatura dos raios de luz no campo gravitacional, já citada. Duas outras consequências merecem menção.

Se as velhas leis acompanham as novas quando as forças do campo gravitacional são fracas, só podemos esperar desvios da lei de Newton em campos de forças gravitacionais comparativamente fortes. Vejamos o nosso sistema solar. Os planetas movem-se em redor do Sol em órbitas elípticas. Mercúrio é o mais próximo do Sol. A atracção entre Mercúrio e o Sol é mais forte que entre o Sol e qualquer outro planeta, visto que a distância entre o Sol e Mercúrio é menor. Se pretendemos

descobrir um desvio da lei de Newton, teremos as maiores probabilidades no caso de Mercúrio. Da lei clássica decorre que a órbita descrita por Mercúrio é da mesma forma de todas as demais, apenas está mais próxima do Sol. De acordo com a relatividade geral, o movimento deve ser um pouco diferente.

Não só Mercúrio gira em torno do Sol, como a elipse que ele descreve deve girar muito lentamente em relação ao SC ligado ao Sol. Esta rotação da elipse exprime o novo efeito da relatividade geral. A nova teoria prediz a grandeza deste feito. A elipse de Mercúrio realiza a rotação completa em três milhões de anos! Vemos quão pequeno é o efeito e quão inútil será procurá-lo no caso de planetas mais afastados do Sol.

O desvio da elipse no movimento de Mercúrio foi percebido antes que a teoria da relatividade estivesse formulada — e nenhuma explicação apareceu. Por outro lado, a relatividade geral desenvolveu-se sem nenhuma atenção para com este problema especial. Só mais tarde é que a conclusão sobre a rotação da elipse no movimento de um planeta foi deduzida das novas equações da gravidade. No caso de Mercúrio a nova teoria explicou satisfatoriamente o desvio que esse movimento apresenta das leis de Newton.

Mas há ainda outra conclusão tirada da relatividade geral e verificada pela experiência. Já vimos que um relógio colocado no círculo grande do disco em rotação tem ritmo diferente do colocado no círculo pequeno. Semelhantemente, um relógio colocado no Sol terá o ritmo diferente de um colocado na Terra, pois a influência do campo gravitacional é muito maior no Sol do que na Terra.

Na pág. 94 observámos que o sódio incandescente emite luz amarela homogénea de um comprimento definido de onda. Na sua radiação o átomo revela um dos seus ritmos; o átomo representa, digamos, um relógio, e o comprimento da onda emitida um dos seus ritmos. De acordo com a relatividade geral, o comprimento de uma onda de luz emitida por um átomo de sódio colocado, digamos, no Sol, deve ser levemente maior que o da onda de luz emitida por um átomo de sódio na Terra.

O problema de verificar as consequências da relatividade geral por meio da observação é intrincado e ainda não foi definitivamente resolvido. Como estamos apenas lidando com as ideias principais, não pretendemos entrar a fundo na matéria, mas apenas estabelecer que o veredicto da experiência parece, até agora, confirmar as conclusões tiradas da relatividade geral.

## CAMPO E MATÉRIA

Vimos como e porque o ponto de vista mecanicista se desmoronou. Era impossível explicar todos os fenómenos pela admissão de que forças simples agem entre partículas inalteráveis. As nossas primeiras tentativas para ir além do ponto de vista mecânico e introduzir os conceitos de campo provaram melhor nos domínios dos fenómenos electromagnéticos. As leis de estrutura do campo electromagnético foram formuladas; leis que ligavam entre si eventos muito próximos no espaço e no tempo. Essas leis adaptam-se à estrutura da rela-

tividade restrita, desde que não variam na transformação de Lorentz. Depois a teoria da relatividade geral formulou as leis gravitacionais. São leis de estrutura que descrevem o campo gravitacional entre partículas materiais. Também foi fácil generalizar as leis de Maxwell de modo que pudessem ser aplicadas a qualquer SC, como as leis gravitacionais da relatividade geral.

Temos duas realidades: *matéria* e *campo*. Não podemos hoje imaginar o conjunto físico arquitectado sobre o conceito de matéria, como sucedeu aos físicos do século XIX. De momento aceitamos os dois conceitos. Mas poderemos pensar em matéria e campo como duas realidades distintas? Dada uma pequena partícula de matéria é possível figurar, ingenuamente, que há uma definida superfície da partícula em que ela cessa de existir e o seu campo gravitacional aparece. Na nossa figuração, a região em que as leis do campo são válidas separa-se abruptamente da região em que a matéria está presente. Mas quais os critérios físicos de distinção entre matéria e campo? Antes da teoria da relatividade poderíamos responder desta maneira: a matéria tem massa e o campo não. Campo representa energia e matéria representa massa. Mas já sabemos que tal resposta é inadequada perante os novos conhecimentos adquiridos. A teoria da relatividade diz-nos que a matéria representa vastas reservas de energia e que a energia representa matéria. Quantitativamente, não podemos distinguir entre matéria e campo, uma vez que a distinção entre massa e energia não é qualitativa. A maior parte da energia está concentrada na matéria; mas o campo vizinho à partícula também representa energia, embora em quantidade incomparavelmente menor. Podemos, portanto, dizer: matéria é onde a concentração da energia é grande; campo, onde a concentração é pequena. Mas, se é este o caso, então as diferenças entre matéria e energia são quantitativas, não qualitativas. Não faz sentido considerar matéria e campo como duas qualidades diferentes entre si. Não podemos imaginar uma linha definida que distintamente separe matéria e campo.

Surge a mesma dificuldade para a carga e o seu campo. Parece impossível formular um critério de distinção entre matéria e campo ou entre carga e campo.

As leis estruturais de Maxwell e as leis gravitacionais falham para as grandes concentrações de energia, ou, melhor, onde fontes de campo, isto é, cargas eléctricas ou matéria, se apresentam. Mas não poderíamos modificar levemente as nossas equações de modo que fossem válidas por toda a parte, e ainda em regiões onde a energia está enormemente concentrada?

Impossível erguer a física apenas sobre o conceito da matéria. Mas a divisão em matéria e campo, depois da admissão da equivalência da massa e da energia, é algo artificial e não claramente definido. Poderemos rejeitar o conceito de matéria e construir um puro campo físico? O que impressiona os nossos sentidos como matéria é realmente uma grande concentração de energia num espaço comparativamente pequeno. Temos de considerar a matéria como regiões do espaço onde o campo é extremamente forte. Deste modo um novo fundo filosófico emerge. O seu objectivo final será a explanação de todos os eventos da Natureza por meio de leis estruturais válidas para toda a parte e sempre. Uma pedra arremessada é, desse ponto de vista, um campo variável, onde os estados de maior intensidade do campo caminham no espaço com a velocidade da pedra. Não há lugar na nova física para campo e matéria, pois a única realidade é a do campo. Este novo conceito é sugerido pelas grandes realizações da física, pelos nossos triunfos no exprimir as leis da electricidade, do magnetismo e da gravitação sob forma de leis estruturais, e, finalmente, pela equivalência entre massa e energia. O nosso último problema será modificar as leis de campo de modo que não falhem nas regiões de energia enormemente concentrada.

Mas até agora não conseguimos realizar este programa de maneira consistente e convincente. A decisão final está no futuro. Temos ainda hoje de manter nas nossas construções teóricas duas realidades: campo e matéria.

Defrontam-nos ainda muitos problemas fundamentais. Sabemos que toda a matéria é construída por uns tantos tipos de partículas. Como saem destas partículas elementares as várias formas de matéria? Como entre-actuam essas partículas no campo? Para a investigação destas novas ideias foi introduzida na física a teoria do *quantum*.

RESUMINDO:

*Um novo conceito aparece na física, o mais importante desde o tempo de Newton: o campo. É necessário grande imaginação científica para compreender que o essencial na descrição dos fenómenos físicos não é a carga ou a partícula, mas o campo no espaço entre as cargas e as partículas. O conceito de campo mostra-se o mais aceitável e conduz à formulação das equações de Maxwell, que descrevem a estrutura do campo electromagnético e governam tanto os fenómenos eléctricos como os ópticos.*

*A teoria da relatividade surge deste problema do campo. As contradições e inconsistências das velhas teorias forçam-nos a atribuir novas propriedades ao contínuo espaço-tempo, cenário de todos os eventos do nosso mundo físico.*

*A relatividade desenvolve-se em dois rumos. O primeiro leva ao que é conhecido como relatividade restrita, aplicada somente ao sistema coordenado inercial, que é aquele em que a lei da inércia formulada por Newton é válida. A relatividade restrita baseia-se em duas suposições fundamentais: as leis físicas são as mesmas em todos os sistemas de coordenadas que se movem uniformemente em relação um ao outro; a velocidade da luz tem sempre o mesmo valor. Destas suposições, plenamente confirmadas pela experiência, são deduzidas as propriedades das barras e relógios em movimento, as suas mudanças em extensão e ritmo dependentes da velocidade. A teoria da relatividade altera as leis da mecânica. As velhas leis ficam*

*invalidadas se a velocidade da partícula em movimento se aproxima da da luz. As novas leis para um corpo em movimento, como foram formuladas pela relatividade, confirmam-se esplendidamente no campo experimental. Uma posterior consequência da relatividade é a ligação entre massa e energia. Massa é energia e a energia tem massa. As duas leis, da conservação da massa e da conservação da energia, combinam-se em uma: a lei da conservação da massa-energia.*

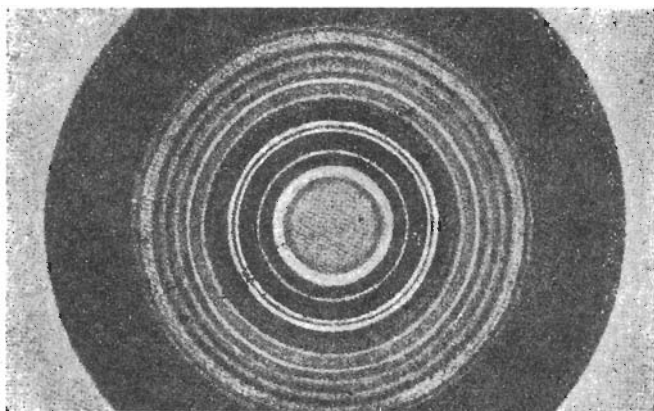
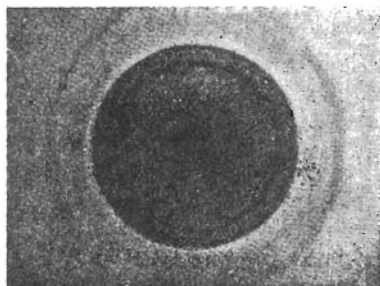
*A teoria da relatividade geral dá ainda uma análise mais profunda do contínuo espaço-tempo. A validade da teoria já não se restringe aos sistemas de coordenadas inerciais. A teoria ataca o problema da gravitação e formula novas leis de estrutura para o campo gravítico. Força-nos a analisar o papel representado pela geometria na descrição do mundo físico. Considera o facto da igualdade da massa inercial e gravítica como essencial e não, como na mecânica antiga, meramente acidental. As consequências experimentais da relatividade geral diferem levemente das da velha mecânica. Suportam a prova da experiência, sempre que a comparação é possível. Mas a força da relatividade jaz na sua consistência interior e na simplicidade dos seus postulados fundamentais.*

*A teoria da relatividade frisa a importância do conceito de campo. Mas, como ainda não conseguimos formular um puro campo físico, temos provisoriamente de admitir a existência de ambos os conceitos: campo e matéria.*

*(Fotografia de A. G. Shenstone)*

Linhas espectrais

*(Fotografia de Lastowicki e Gregor)*

Difracção dos raios X

*(Fotografia de Loria e Klinger)*

Difracção de ondas electrónicas

# «QUANTA»

## CONTINUIDADE-DESCONTINUIDADE

ABERTO diante de nós está um mapa de Nova Iorque e arredores. Perguntamos: que pontos neste mapa podem ser atingidos de comboio? O horário dos caminhos-de-ferro indica-nos esses pontos, que marcamos no mapa. A nossa pergunta agora é: que pontos podem ser atingidos de automóvel? Se no mapa traçarmos linhas representando todas as estradas que partem de Nova Iorque, cada ponto destas estradas pode ser atingido de automóvel. Nos dois casos temos determinação de pontos. No primeiro, esses pontos estão separados uns dos outros e representam as diferentes estações dos caminhos-de-ferro. No segundo, são pontos ao longo das linhas que representam as estradas. A nossa pergunta seguinte é sobre a distância entre cada um desses pontos e um dado ponto de Nova Iorque. No primeiro caso, certos números correspondem aos pontos do mapa. Esses números mudam irregularmente, aos saltos. Dizemos: as distâncias entre Nova Iorque e os pontos que podem ser atingidos de comboio mudam de um modo *descontínuo*. Os pontos que podemos atingir de automóvel mudam tão levemente que variam de um modo *contínuo*. As mudanças em distâncias podem ser arbitrariamente mínimas no caso do automóvel, mas não no caso dos comboios.

A produção de uma mina de hulha pode mudar de um modo contínuo. O total do carvão produzido pode aumentar ou diminuir em quantidades arbitrariamente pequenas. Mas o número de mineiros empregados nas minas só pode mudar descontinuamente. Não teria sentido dizer: «Desde ontem que o número de mineiros aumentou de 3,783.»

Perguntando a respeito da soma de dinheiro que tem no bolso, um homem pode dar um número contendo apenas dois decimais. Uma soma de dinheiro só pode mudar aos saltos, de um modo descontínuo. O menor troco possível na América, ou por outras palavras, o «quantum elementar» da moeda americana, é um cêntimo. O «quantum» da moeda inglesa é um *farthing*, que vale metade do «quantum» elementar americano. Temos aqui exemplo de dois «quanta» elementares, cujos valores podem ser comparados. A relação dos seus valores tem um sentido definido, desde que um vale duas vezes o outro.

Podemos dizer: algumas quantidades mudam continuamente e outras só mudam descontinuamente, por passos que não podem ser reduzidos. Estes passos indivisíveis são chamados os *quanta elementares* da coisa a que se referem.

Podemos pesar grandes quantidades de areia e considerar a massa dessa areia como contínua, já que a sua estrutura granular é evidente. Mas, se a areia se tornasse muito preciosa e houvéssemos de empregar balanças ultra-sensíveis, teríamos de considerar o facto de que a massa sempre muda por números múltiplos de um grão. A massa desse grão seria o nosso «quantum» elementar. Destes exemplos vemos como o carácter descontínuo de uma quantidade até certo momento considerada contínua pode ser apreendido pelo aumento de precisão nas nossas medidas.

Para caracterizar numa frase a ideia principal da teoria do «quantum», diremos: deve ser admitido que *certas quantidades físicas até aqui consideradas contínuas são compostas de «quanta» elementares.*

A região de factos abrangidos pela teoria do «quantum»

é tremendamente grande — factos postos em relevo pelo enorme desenvolvimento da técnica moderna. Como neste livro não cabe a descrição das experiências básicas, somos forçados a apenas citar dogmaticamente os seus resultados. O nosso objectivo resume-se a explicar as principais ideias fundamentais.

## OS «QUANTA» ELEMENTARES DE MATÉRIA E DE ELECTRICIDADE

Na representação da matéria dada pela teoria cinética, todos os elementos são constituídos por moléculas. Tomemos o caso do elemento mais leve, o hidrogénio. Na pág. 62 vimos como o estudo dos movimentos de Brown nos levou à determinação da massa de uma molécula de hidrogénio, cujo valor é:

0,000 000 000 000 000 000 000 0033 gramas

Isto quer dizer que a massa é descontínua. A massa de uma quantidade de hidrogénio só pode mudar por um número inteiro de pequenos passos correspondentes à massa de uma molécula de hidrogénio. Mas os processos químicos mostram que a molécula de hidrogénio pode romper-se em duas partes, ou, por outras palavras, que a molécula de hidrogénio se compõe de dois átomos. Nos processos químicos é o átomo, não a molécula, que representa o papel de «quantum» elementar. Dividindo-se o número acima por dois, temos a massa de um átomo de hidrogénio:

0,000 000 000 000 000 000 000 00165 gramas

A massa é uma quantidade descontínua, mas naturalmente não temos de nos preocupar com isto quando determinamos pesos. Mesmo as mais sensíveis balanças estão longe de alcançar

o grau de precisão capaz de averiguar a variação da descontinuidade da massa.

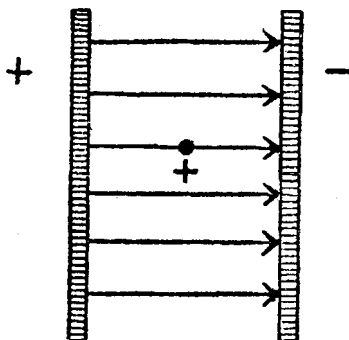
Voltemo-nos para um facto bem conhecido, ao fio ligado à origem de uma corrente eléctrica. Pelo fio a corrente flui do mais alto ao mais baixo potencial. Tenhamos em vista que muitos factos experimentais foram explicados pela teoria dos fluidos eléctricos correndo pelos fios. Recordemos também que a decisão de que o fluido positivo flui do mais alto ao mais baixo potencial, ou de que o fluido negativo flui do mais baixo ao mais alto, é meramente convencional. De momento deixemos de lado os progressos resultantes dos conceitos de campo. Mesmo pensando nos fluidos eléctricos nestes termos simples, ainda surgem questões. Como a palavra «fluido» o sugere, a electricidade foi tida antigamente como uma quantidade contínua. O total da carga podia ser mudado por passos arbitrariamente pequenos. Não havia necessidade de admitir os «quanta» eléctricos. As realizações da teoria cinética da matéria prepararam-nos para uma nova questão: existem «quanta» elementares do fluido eléctrico? A outra questão a ser esclarecida é: consiste a corrente num fluxo do positivo, do negativo, ou dos dois fluidos juntos?

A ideia de todas as experiências imaginadas para resolver esta questão, é tirar do fio o fluido eléctrico para fazê-lo caminhar no espaço; desse modo ficaria sem qualquer associação com a matéria e as suas propriedades poderiam ser melhormente estudadas. Muitas experiências deste tipo foram feitas no último século. Vamos ver alguns resultados. O fluido eléctrico que circula no fio é negativo e portanto dirigido do mais baixo ao mais alto potencial. Se soubéssemos disto no começo, quando a teoria dos fluidos eléctricos foi formulada, poderíamos ter invertido as denominações; a electricidade da barra de borracha seria a positiva e a da barra de vidro, a negativa. Muito mais conveniente teria sido considerar o fluido que flui como o positivo. Mas como a primitiva concepção nasceu errada, temos de arcar com a inconveniência. A segunda ques-

tão de importância é se a estrutura desse fluido negativo é «granular» — se é ou não composta de «quanta» eléctricos. Outra vez aqui um certo número de experiências mostra que não há dúvida sobre a existência de um «quantum» elementar nesta electricidade negativa. O fluido negativo é formado por grãos, do mesmo modo que uma praia é formada por grãos de areia e uma casa, por tijolos. Há quarenta anos que isto foi claramente exposto por J. J. Thomson. Os «quanta» elementares da electricidade negativa receberam o nome de *electrões*. Assim, cada carga eléctrica compõe-se de uma multidão de cargas elementares representada por electrões. A carga negativa só pode, do mesmo modo que a massa, variar descontinuamente. A carga eléctrica elementar é, pois, tão pequena que em muitas investigações se torna possível, e muito mais conveniente, considerá-la como uma quantidade contínua. Deste modo as teorias atómica e electrónica introduzem na ciência quantidades físicas descontínuas que variam por saltos.

Imaginem-se duas chapas de metal paralelas, num lugar donde todo o ar seja eliminado. Uma está com carga positiva e outra com carga negativa. Uma carga positiva, solta entre as duas chapas, será repelida pela carregada positivamente e atraída pela carregada negativamente. Assim, as linhas de força do campo eléctrico serão dirigidas da chapa de carga positiva para a de carga negativa. A força actuante sobre um corpo carregado negativamente teria a direcção oposta. Se as chapas forem suficientemente grandes, as linhas de força entre elas serão igualmente densas em todos os pontos; não tem importância onde o corpo seja colocado; a força, e portanto a densidade das linhas de força, será a mesma. Os electrões levados a qualquer parte entre as chapas comportar-se-iam como gotas de chuva no campo gravítico da Terra, e mover-se-iam parelamente um ao outro, da chapa negativa para a positiva. Existem muitos arranjos experimentais para mostrar o chuveiro de electrões em tal campo, dirigidos por este campo na mesma direcção. Um dos mais simples é introduzir um fio aquecido

entre as duas chapas. O fio emite electrões que são dirigidos pelas linhas de força do campo externo. Os tubos de rádio, familiares a toda a gente, baseiam-se neste princípio.

Engenhosas experiências foram concebidas com um raio de electrões. As mudanças de órbita dos electrões em diferentes campos eléctricos e magnéticos externos têm sido investigadas.

Tornou-se até possível isolar um só electrão e determinar a sua carga elementar e a sua massa, isto é, a sua resistência inercial à acção de uma força externa. Aqui só citaremos o valor da massa do electrão, *duas mil vezes menor* que a massa do átomo de hidrogénio. Assim, a massa do átomo de hidrogénio, mínima como é, surge grande em comparação com a massa do electrão. Do ponto de vista de uma consistente teoria de campo, o total da massa, isto é, a energia total de um electrão, é a energia do seu campo; a amplitude da sua força está dentro de uma pequeníssima esfera e ao afastar-se do «centro» do electrão esta força enfraquece.

Dissemos atrás que o átomo de um elemento é o seu menor «quantum» elementar. Este conceito foi por muito tempo admitido — mas já o não é hoje! A ciência concebeu novas ideias, que mostram as limitações da antiga. Poucas afirmações na

física, baseadas em factos, são mais sólidas que a da complexidade do átomo. Primeiramente veio a compreensão de que o electrão, o «quantum» elementar do fluido negativo, é um dos componentes do átomo, um dos tijolos elementares com que toda a matéria se constrói. O exemplo acima citado, do fio incandescente que emite electrões, constitui um dos numerosos exemplos da extracção dessas partículas da matéria. Tal resultado, que liga intimamente o problema da estrutura da matéria ao da electricidade, procede de muitos factos experimentais independentes.

É comparativamente fácil extrair de um átomo alguns dos electrões de que ele se compõe. Isto pode ser feito pelo calor, como no nosso caso do fio aquecido ou ainda pelo bombardeio de átomos por meio de electrões.

Suponhamos um fio metálico aquecido ao rubro e inserido num ambiente de hidrogénio rarefeito. O fio emitirá electrões em todas as direcções.

Sob a acção de um campo eléctrico estranho uma dada velocidade lhes será comunicada. Um electrão aumenta a velocidade do mesmo modo que a pedra que cai. Por este método podemos obter um raio de electrões projectando-se com definida velocidade em definida direcção. E é possível alcançar velocidades comparáveis à da luz, por meio da sujeição de electrões à acção de campos muito fortes. Que acontece quando um raio de electrões de velocidade definida se choca de encontro às moléculas do hidrogénio rarefeito? O choque não só rompe essas moléculas em dois átomos, como ainda extrai de um deles um electrão.

Aceitemos o facto de que os electrões são os constituintes da matéria. Nesse caso, um átomo do qual um electrão foi arrancado não pode ser electricamente neutro. Se antes foi neutro, não o pode ser agora, já que está mais pobre de uma carga elementar. O que lhe resta deve ter carga positiva. Além disso, desde que a massa de um electrão é muito menor que a do mais leve átomo, podemos com segurança concluir que a

maior parte da massa do átomo não é representada por electrões, mas pelo remanescente das partículas elementares mais pesadas que os electrões. A esta parte pesada do átomo chamaremos *núcleo*.

Modernas experiências têm desenvolvido processos de quebrar o núcleo dos átomos, de mudar os átomos de um elemento em átomos de outro, e de extrair dos núcleos a pesada partícula elementar de que é construído. Este capítulo, na física denominado «física nuclear», deve muito a Rutherford, e é do ponto de vista experimental o mais interessante de todos. Mas uma teoria, simples nas suas ideias fundamentais, relacionando uma grande variedade de factos no domínio da física nuclear, ainda se mostra vacilante. Como nesta obra só estamos interessados nas ideias físicas gerais, a despeito da sua alta importância omitiremos este capítulo.

## OS «QUANTA» DE LUZ

Consideremos um muro construído na praia. As ondas chocam-se nele continuamente, escalavram-lhe parte da superfície e retiram-se, deixando caminho franco para novas ondas. A massa do muro decresce, e podemos perguntar quanto dela é subtraída durante um ano. Mas figuremos agora um diferente processo. Queremos diminuir a massa do muro da mesma quantidade mas por um sistema diverso. Damos tiros no muro e desagregamo-lo nos pontos em que as balas batem. A massa do muro decresce, e podemos imaginar que uma igual redução de massa se opera nos dois casos. Da aparência do muro, entretanto, podemos facilmente ver se é o contínuo choque das ondas que actua ou o descontínuo choque das balas. Para a boa compreensão do que vamos expor é de vantagem que tenhamos em mente a diferença entre as ondas e o chuveiro das balas.

Dissemos atrás que o fio aquecido emite electrões. Aqui

temos de introduzir outro meio de destacar electrões do metal. A luz homogénea, tal como a luz violeta, que é, como sabemos, a luz de um definido comprimento de onda, é dirigida de encontro a uma superfície de metal. Essa luz extrai electrões do metal. Os electrões são arrancados do metal e um chuveiro deles projecta-se com definida velocidade. Do ponto de vista do princípio da energia, podemos dizer: a energia da luz transforma-se parcialmente na energia cinética dos electrões expelidos. A técnica moderna habilita-nos a registar esses electrões-balas, a determinar-lhes a velocidade e, portanto, a sua energia. Esta extracção de electrões por meio da luz sobre o metal toma o nome de *efeito fotoeléctrico.*

O nosso ponto de partida foi a acção de uma onda de luz homogénea de certa intensidade definida. Temos agora de modificar as disposições da nossa experiência para ver se a intensidade da luz exerce alguma influência no efeito observado.

Comecemos por mudar a intensidade da luz violeta que incide sobre a chapa de metal observando até que ponto a energia dos electrões emitidos depende da intensidade da luz, mas primeiro raciocinemos. Podemos ponderar: no efeito fotoeléctrico, certa porção da energia de radiação transforma-se em energia de movimento dos electrões. Se de novo iluminamos o metal com luz do mesmo comprimento de onda, mas vinda de fonte mais poderosa, nesse caso a energia emitida pelos electrões deve ser maior, visto que a radiação é mais rica de energia. Podemos, portanto, esperar que a velocidade dos electrões emitidos cresça com o aumento de intensidade da luz. Mas a experiência novamente contradiz esta predição. Vemos de novo que as leis da Natureza não são o que queremos que sejam. Do ponto de vista da teoria ondulatória da luz a experiência revela-se desnorteante. Não há mudança da velocidade dos electrões quando a intensidade da luz aumenta!

Este resultado experimental não pode ser previsto pela teoria ondulatória. E uma nova teoria emerge do choque entre a velha teoria e os factos.

Deliberadamente vamos agora mostrar-nos injustos para com a teoria ondulatória da luz, esquecendo as suas altas realizações e a sua esplêndida explicação da curvatura da luz em redor de pequeninos obstáculos. Voltemo-nos para o efeito fotoeléctrico e peçamos a essa teoria uma explicação deste fenómeno. Claro que não podemos deduzir da teoria ondulatória a independência em que a energia dos electrões está da intensidade da luz que os extrai da chapa metálica. Temos por isso de tentar nova teoria. Recordemos que a teoria corpuscular de Newton faliu na explicação da curvatura da luz. No tempo de Newton ainda não nascera o conceito de energia. Os corpúsculos de luz não tinham peso; as cores conservavam o carácter de substância. Mais tarde, quando o conceito de energia nasceu e passámos a admitir que a luz era portadora de energia, ninguém pensou na aplicação destes conceitos à teoria corpuscular da luz. A teoria de Newton estava já morta, e até aos nossos tempos ninguém admitiu a sério a sua ressurreição.

Para conservar a principal ideia da teoria de Newton temos de supor que a luz homogénea é composta de grãos de energia e substituir os velhos corpúsculos de luz pelos «quanta» de luz, a que chamaremos *fotões*: pequenas porções de energia que viajam pelo espaço com a velocidade da luz. A revivescência da teoria de Newton sob esta nova forma leva-nos à *teoria do «quantum» da luz*. Não só a matéria e a carga eléctrica, como também a energia da radiação têm estrutura granular, isto é, compõem-se de «quanta» de luz. Além dos «quanta» de matéria e dos «quanta» de electricidade, há os «quanta» de energia.

A ideia dos «quanta» de energia foi introduzida no começo deste século por Planck, a fim de explicar alguns efeitos mais complicados que o fotoeléctrico. Mas o foto-efeito mostra muito claramente a necessidade de mudança dos nossos velhos conceitos.

Tornou-se logo evidente que esta teoria do «quantum» de

luz explicava o efeito fotoeléctrico. Um chuveiro de fotões cai sobre uma chapa de metal. A acção entre a radiação e a matéria consiste em muitos processos singulares em que um fotão choca com um átomo e lhe arranca um electrão.

Estes processos singulares são sempre idênticos, e em todos os casos o electrão extraído tem a mesma energia. Também compreendemos que aumentar a intensidade da luz significa, na nova linguagem, aumentar o número de fotões em projecção. Neste caso, um diferente número de electrões pode ser extraído do metal, mas a energia de cada um não muda. Vemos, pois, que a nova teoria está de pleno acordo com a observação.

Que acontece quando um raio de luz homogénea de cor diferente, digamos vermelha em vez de violeta, cai sobre a superfície da chapa? Deixemos que a experiência responda à pergunta. A energia dos electrões extraídos pela luz vermelha apresenta-se menor que a dos electrões extraídos pela luz violeta. Isto quer dizer que a energia dos «quanta» de luz é diferente para as diferentes cores. Os fotões do vermelho têm metade da energia dos fotões do violeta. Ou, mais rigorosamente: a energia do «quantum» de luz de uma cor homogénea decresce na proporção em que o comprimento da onda cresce. Isto constitui uma diferença essencial entre os «quanta» de energia e os «quanta» de electricidade. Os «quanta» de luz diferem com o comprimento da onda, ao passo que os «quanta» de electricidade são sempre os mesmos. Se fôssemos usar algumas das nossas analogias anteriores, poderíamos comparar os «quanta» de luz aos «quanta» monetários, os quais diferem em todos os países.

Continuemos a pôr de lado a teoria ondulatória da luz e a admitir que a estrutura da luz é granular e formada pelos «quanta» de luz, isto é, pelos fotões que caminham no espaço com a velocidade da luz. Assim, na nossa nova representação a luz é um chuveiro de fotões e o fotão é o «quantum» elementar de energia da luz. Se, porém, afastamos a teoria da

onda, o conceito do comprimento de onda desaparece. E que o substitui? A energia dos «quanta» de luz! Uma transposição entre as duas teorias pode ser formulada assim:

| *Terminologia da Teoria do «Quantum»* | *Terminologia da Teoria da Onda* |
|---|---|
| A luz homogénea contém fotões de uma definida energia. A energia do fotão da banda vermelha do espectro é metade do da banda violeta. | A luz homogénea tem um definido comprimento de onda. O comprimento de onda do vermelho é duas vezes o do violeta. |

Tudo isto pode ser sumarizado desta maneira: há fenómenos que se explicam pela teoria do «quantum» mas não pela teoria da onda. Os foto-efeitos fornecem-nos um exemplo, embora outros fenómenos do mesmo tipo sejam conhecidos. Há fenómenos que podem ser explicados pela teoria ondulatória, mas não pela do «quantum» — como a curvatura da luz. Finalmente, há fenómenos, tais como o da propagação rectilínea da luz, que podem ser igualmente explicados por ambas as teorias.

Mas que é a luz na realidade? Onda ou chuveiro de fotões? Já propusemos uma questão similar quando indagámos se a luz era onda ou chuveiro de corpúsculos. Nesse momento havia razões para afastar a teoria corpuscular e aceitar a ondulatória. Agora, porém, o problema está muito mais complicado. Não parece possível obter uma descrição aceitável dos fenómenos da luz pela escolha de uma só das duas linguagens. Ora temos de usar uma, ora outra, e às vezes uma e outra. Surge-nos um novo tipo de dificuldade. Temos duas representações contraditórias da realidade; separadamente nenhuma explica os fenómenos da luz — mas juntas explicam-no-los!

Como será possível combiná-las? Como poderemos compreender estes dois aspectos tão diferentes da luz? Não é fácil resolver este problema novo — e fundamental.

Para já aceitemos a teoria do fotão e experimentemos com o seu auxílio compreender fenómenos até aqui explicados pela teoria ondulatória. Temos de frisar as dificuldades que à primeira vista tornam as duas teorias irreconciliáveis.

Recordemos: o raio de luz homogénea que passa por um furo de alfinete dá anéis claros e escuros (pág. 106). Como, fora da teoria da onda, é possível compreender este fenómeno? Por meio da teoria do «quantum» de luz? Um fotão passa através do furo. Podemos esperar luminosidade na tela, se o fotão o atravessa; e esperar escuridão, se o não atravessa. Em vez disso temos anéis de luz e sombra. Tentemos explicar assim: talvez haja uma acção recíproca entre a beira do furo e o fotão, e seja essa interacção a responsável pelo aparecimento dos anéis de difracção. Esta sentença, porém, não pode ser considerada como explicação. No máximo esboça um programa explicativo, admitindo esperanças de uma futura compreensão da direcção pela acção recíproca entre a matéria e o fotão.

Mas até esta fraca esperança se anula na discussão que já fizemos da outra experiência. Tomemos dois furos de alfinete. A luz homogénea que passa por eles dá listas de luz e sombra. Como pode este efeito ser compreendido do ponto de vista do «quantum»? Surge o argumento: um fotão passa através de um ou outro dos furos. Se um fotão de luz homogénea representa uma partícula elementar de luz, não podemos imaginar a sua divisão e a sua passagem através dos dois furos. Mas, nesta hipótese, o efeito devia ser exactamente como no primeiro caso, anéis de luz e sombra e listas de luz e sombra. Como é possível que a presença do segundo furo mude completamente o efeito? Aparentemente o furo através do qual o fotão não passa muda os anéis em listas! Se o fotão se comporta como um corpúsculo da velha física, deve passar através

de um dos furos. Mas, neste caso, o fenómeno da difracção torna-se completamente incompreensível.

A ciência força-nos a criar novas ideias, novas teorias. O objectivo é derrubar as muralhas de contradição que frequentemente bloqueiam o caminho do progresso científico. Todas as ideias essenciais da ciência nasceram do dramático choque entre a realidade e as nossas tentativas de compreensão. Temos, diante de nós, portanto, um problema para cuja solução se tornam necessários novos princípios. Antes de falar nas tentativas da física moderna para explicar a contradição entre o «quantum» e os aspectos ondulatórios da luz, veremos que as mesmas dificuldades surgem quando também examinamos os «quanta» da matéria.

## ESPECTRO DA LUZ

Já sabemos que a matéria é constituída por alguns tipos apenas de partículas. Os electrões foram as primeiras partículas elementares da matéria de que tivemos revelação. Mas os electrões são também «quanta» elementares de electricidade negativa. Verificámos, depois, que alguns fenómenos nos forçam a admitir que a luz é composta de «quanta» elementares, variáveis para os diferentes comprimentos de onda. Antes de prosseguir, vamos examinar alguns fenómenos físicos nos quais a matéria e a radiação representam um papel essencial.

O Sol emite radiação que o prisma desdobra em componentes. Desse modo pode ser obtido o espectro contínuo do Sol onde cada comprimento de onda entre os dois extremos do espectro visível se encontra representado. Tomemos outro exemplo. Já vimos que o sódio incandescente emite luz homogénea, luz de uma cor, ou de um só comprimento de onda. Esse sódio incandescente, colocado diante do prisma, dá uma linha amarela. Em geral, se um corpo radiante é colocado

diante do prisma, a luz que ele emite desdobra-se nos seus componentes, revelando o espectro característico do corpo emissor.

A descarga de electricidade num tubo de gás produz uma fonte de luz, como se vê nos tubos de *néon* da publicidade luminosa. Suponhamos tal tubo diante do espectroscópio. O espectroscópio é um instrumento que age como o prisma, mas com muito maior acuidade; desdobra a luz nos seus componentes, isto é, analisa-a. A luz do Sol vista através do espectroscópio dá um espectro contínuo; todos os comprimentos de onda estão ali representados. Se, porém, a fonte de luz é um gás percorrido pela corrente eléctrica, o espectro revela-se de carácter diferente. Em vez da imagem contínua e multicolorida do espectro solar, aparecem listas brilhantes sobre fundo escuro. Cada lista corresponde a uma cor ou, na linguagem da teoria ondulatória, a um comprimento de onda. Se vinte linhas, por exemplo, são visíveis no espectro, cada qual será designada por um dos vinte números que exprimem os comprimentos de onda. Os vapores dos vários elementos possuem diferentes sistemas de linhas. Não há dois idênticos, como não há duas pessoas de impressões digitais idênticas. Como um catálogo destas linhas já foi elaborado pelos físicos, a existência de leis tornou-se gradualmente evidente, e foi possível estabelecerem-se fórmulas matemáticas.

Tudo que acabamos de dizer pode ser traduzido para a linguagem dos fotões. As listas correspondem a certos e definidos comprimentos de onda, ou a fotões de energia definida. Os gases luminosos, portanto, não emitem fotões com todas as energias possíveis, mas somente aqueles que caracterizam a substância. Novamente a realidade limita a riqueza de possibilidades.

Os átomos de um certo elemento, digamos, do hidrogénio, podem emitir unicamente fotões de uma definida energia. Só lhes é permitida a emissão de definidos «quanta» de energia; todos os demais são proibidos. Imaginemos que algum

elemento emite uma só linha, isto é, emite só fotões de uma definida, pode ser expresso de outra maneira: só dois níveis antes da emissão e mais pobre depois. Do princípio da energia deve concluir-se que o *nível de energia* é mais alto antes da emissão e mais baixo depois, e que a diferença entre os dois níveis deve ser igual à energia do fotão emitido. Assim, o facto de um átomo de certo elemento emitir radiação de um só comprimento de onda, isto é, só fotões de uma energia definida, pode ser expressão de outra maneira: só dois níveis de energia são admissíveis num átomo deste elemento, e a emissão de um fotão corresponde à transição de um átomo, do mais alto ao mais baixo nível de energia.

Geralmente, porém, mais linhas aparecem no espectro dos elementos. Os fotões emitidos correspondem a muitas energias, não apenas a uma. Ou, por outras palavras, devemos admitir que muitos níveis de energia são permitidos num átomo e que a emissão de um fotão corresponde à transição de um átomo do mais alto nível de energia ao mais baixo. Não são permitidos todos os níveis de energia, desde que todos os comprimentos de onda e todos os fotões não aparecem no espectro de um elemento. Em vez de dizer que algumas linhas definidas, alguns comprimentos de onda definidos, pertencem ao espectro de cada átomo, podemos dizer que cada átomo tem alguns níveis definidos de energia, e que a emissão dos «quanta» de luz está associada à transição do átomo de um nível de energia para outro. Os níveis de energia são, em regra, descontínuos. De novo vemos as possibilidades restringidas pela realidade.

Foi Bohr quem pela primeira vez mostrou porque justamente essas e não outras linhas aparecem no espectro. A sua teoria, formulada há cinquenta anos, traça o desenho de um átomo do qual em casos simples pode ser calculado o espectro dos elementos — e os números aparentemente confusos e sem relação tornam-se subitamente coerentes com a teoria.

A teoria de Bohr constitui passo intermediário para uma

teoria mais geral e mais profunda, a do «quantum» mecânico. Vamos nas últimas páginas deste livro caracterizar as ideias principais desta teoria. Mas temos antes de mencionar os resultados experimentais de outra teoria.

O espectro visível começa com certo comprimento de onda no violeta e termina com outro comprimento de onda no vermelho. Por outras palavras, as energias dos fotões no espectro visível estão sempre encerradas dentro dos limites estabelecidos pelas energias dos fotões do violeta e do vermelho. Sem dúvida será esta limitação apenas uma propriedade do olho humano. Se a diferença em energia de algum dos níveis de energia é bastante grande, então um fotão *ultravioleta* será emitido, dando uma linha para além do espectro visível. A sua presença não pode ser percebida pela vista humana; tem que ser fotografada.

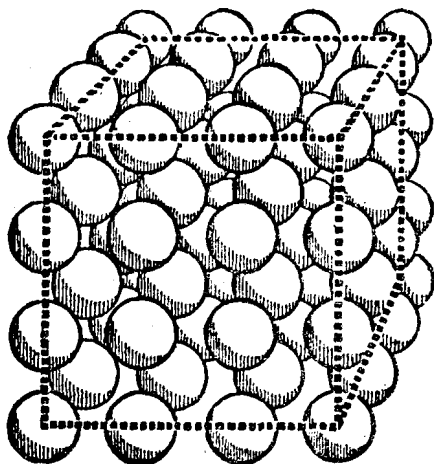
Os raios X são também compostos de fotões de energia muito maiores que os da luz visível, ou, por outras palavras, os seus comprimentos de onda são muito menores, de facto milhares de vezes menores, que os da luz visível.

Mas será possível determinar experimentalmente esses comprimentos de onda, mínimos? Bastante difícil nos foi fazê-lo para a luz comum. Exigia pequeníssimos obstáculos ou pequeníssimas aberturas. Dois alfinetes muito aproximados, mostrando a difracção da luz comum, teriam de ficar milhares de vezes menores e mais próximos para mostrar a difracção dos raios X.

Como medir então o comprimento de onda desses raios? A Natureza veio em auxílio da ciência.

Um cristal é uma aglomeração de átomos dispostos em plano perfeitamente regular, a distâncias muito curtas um do outro. O desenho mostra uma estrutura de cristal. Em vez de minúsculas aberturas há obstáculos extremamente pequenos formados pelos átomos do elemento e arrumados em ordem absolutamente regular. As distâncias entre os átomos, como as revela a teoria da estrutura cristalina, são tão pequenas

que nos mostram o efeito da difracção dos raios X. A experiência de facto provou que é possível difractar a onda do raio X por meio desses mínimos obstáculos dispostos tridimensionalmente num cristal.

Suponhamos que um raio X cai num cristal e depois de atravessá-lo é colhido pela chapa fotográfica: a difracção

ficará patente. Vários métodos têm sido empregados no estudo do espectro dos raios X a fim de deduzir o comprimento de onda da difracção fotografada. O que nestas poucas palavras aqui dizemos poderia encher volumes, se todos os detalhes fossem expostos. Na Estampa III damos um tipo de difracção, obtido por um dos vários métodos desenvolvidos. Novamente vemos os anéis de luz e sombra, tão característicos na teoria ondulatória. No centro o raio não difractado está visível. Se o cristal não fosse interposto entre os raios X e a chapa, só a mancha da luz central seria visível. Por meio de fotografias desse tipo, os comprimentos de onda do espectro dos raios X podem ser calculados; e conhecidos os comprimentos de onda, possibilitam-se conclusões sobre a estrutura do cristal.

## ONDAS DE MATÉRIA

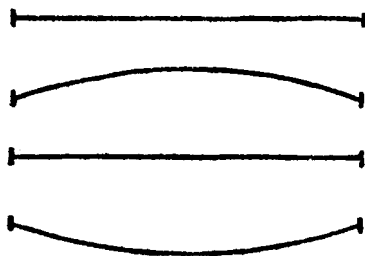
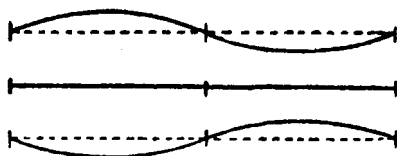
Como podemos compreender o facto de que só certos comprimentos de onda característicos aparecem no espectro dos elementos?

Com muita frequência avanços essenciais foram assegurados pelo esclarecimento de uma analogia entre fenómenos na aparência não relacionados entre si. Nestas páginas já vimos como ideias criadas e desenvolvidas num ramo de ciência eram depois aplicadas a outros. O estudo da interpretação mecânica e da teoria do campo oferece vários exemplos desta

natureza. A associação dos problemas resolvidos com os não resolvidos pode lançar nova luz nas nossas dificuldades, graças à sugestão de ideias novas. Descobrir aspectos idênticos e essenciais desapercebidos por diferenças externas é puro e importante trabalho de criação. O desenvolvimento das chamadas ondas mecânicas, começado há menos de trinta anos por Broglie e Schrodinger, fornece-nos um exemplo típico de uma teoria assim nascida analogicamente.

O nosso ponto de partida é um exemplo clássico que nada tem com a física moderna. Peguemos na extremidade de um longo tubo de borracha e procuremos movê-lo ritmicamente para cima e para baixo, de modo que a outra extremidade oscile. Forma-se uma onda pela oscilação, a qual percorre o tubo com certa velocidade. Se imaginarmos um tubo infinitamente longo, então as ondas formadas seguirão para uma viagem sem fim.

Outro caso agora. As duas extremidades do tubo estão

presas. Que acontece para a onda criada numa das pontas? A onda começa a sua viagem mas logo se vê reflectida pela outra extremidade. Temos agora duas ondas, uma criada pela oscilação e outra pela reflexão; caminham em direcções

opostas e interferem. Não seria difícil traçar a interferência das duas ondas e descobrir a onda resultante da sobreposição: a *onda permanente*. As duas palavras «permanente» e «onda» parecem contradizer-se, mas a sua combinação justifica-se pelo resultado da sobreposição das duas ondas.

O mais simples exemplo da onda permanente está no movimento da corda com as duas extremidades fixas e em movimento de vaivém como se vê no desenho. Este movimento é o resultado de uma onda sobrejacente a outra, quando as duas viajam em direcções opostas. O aspecto característico do movimento é que só as duas extremidades da corda estão em repouso. São os *nós*. A onda, por assim dizer, levanta-se

entre os dois nós, com todos os pontos da corda alcançando simultaneamente o máximo e o mínimo do desvio.

Mas isto é apenas o exemplo mais elementar da onda permanente. Há outros. Por exemplo, uma onda permanente pode ter três nós, os da extremidade e um no centro. Neste caso, três pontos estão sempre em repouso. Uma vista de

olhos ao desenho mostra que o comprimento da onda é aqui metade do comprimento da do exemplo anterior, de dois nós. Semelhantemente, ondas permanentes podem ter quatro, cinco e mais nós. Em cada caso o comprimento da onda dependerá do número de nós. Este número, sendo número inteiro, só pode mudar por saltos. A frase «o número de nós, numa onda permanente, é 3,576» não passa de puro contra-senso. O comprimento da onda muda descontinuamente. Estamos vendo um aspecto, que já nos é familiar, da teoria do «quantum». A onda permanente produzida por um tocador de violino é ainda mais complicada, sendo uma mistura de muitas ondas com dois, três quatro, cinco e mais nós; mistura, portanto, de vários comprimentos de onda. A física pode analisar semelhante mistura, desdobrando a onda permanente nas suas ondas componentes. Analogicamente será o caso de dizer que a corda oscilante tem um espectro, do mesmo modo que um elemento emissor de radiação. E, como no caso do espectro, só certos comprimentos de ondas aparecem; todos os demais não podem ser encontrados.

Verificamos assim certa similaridade entre a corda oscilante e o átomo emissor de radiação. Por estranha que pareça esta analogia, tiremos dela as conclusões e continuemos na comparação. Os átomos de cada elemento são compostos de partículas elementares, as mais pesadas constituindo os núcleos

e as mais leves, os electrões. Tal sistema de partículas comporta-se como um pequeno aparelho acústico em que ondas permanentes se produzem.

As ondas permanentes são o resultado de interferência entre duas ou mais ondas. Se há alguma verdade na nossa analogia, um arranjo mais simples que o do átomo deveria corresponder à onda expansiva. Qual é o arranjo mais simples? No nosso mundo material nada pode ser mais simples do que um electrão, que é uma partícula elementar em que nenhuma força actua; um electrão em repouso ou em movimento uniforme. Podemos admitir mais um elo na cadeia da nossa analogia: electrão em movimento uniforme ⟶ ondas de um definido comprimento. Foi esta a nova e corajosa ideia de Broglie.

Já vimos que há fenómenos em que a luz revela o seu carácter ondulatório e outros em que revela o seu carácter corpuscular. Depois de nos acomodarmos à ideia de que a luz é uma onda, com surpresa verificamos, em certos casos, que ela se comporta como uma chuva de fotões. Mas com os electrões dá-se o contrário. Acostumámo-nos à ideia de que os electrões são partículas ou «quanta» elementares de matéria e de electricidade. A carga e a massa foram investigadas. Se existe alguma verdade na ideia de Broglie, então deve haver um fenómeno em que a matéria revele o seu carácter ondulatório. Esta conclusão, deduzida da analogia com o fenómeno acústico, parece a princípio estranha e incompreensível. Como pode um corpúsculo em movimento ter qualquer coisa de onda? Mas não é a primeira vez que na física nos defrontamos com dificuldades desta ordem. O mesmo problema nos apareceu nos domínios da luz.

As ideias fundamentais desempenham grande papel na formação de uma teoria física. As obras de física estão cheias de complicadas fórmulas matemáticas. Mas o que aparece nos começos de uma teoria física são pensamentos e ideias; só mais tarde as ideias tomam forma matemática, quantitativa, a fim

de possibilitar a comparação com a experiência. Temos um exemplo disto no caso que nos ocupa. A suposição é que o electrão em movimento uniforme se comporta, em alguns fenómenos, como onda. Admitamos que um electrão, ou um chuveiro de electrões, se move uniformemente com a mesma velocidade. A massa, a carga e a velocidade de cada electrão individual não são conhecidas. Se queremos de qualquer modo associar o conceito ondulatório com os electrões em movimento uniforme, surge a questão: qual o comprimento da onda? Temos aqui uma questão quantitativa, e portanto uma teoria mais ou menos quantitativa há que ser arquiteotada a fim de se lhe responder. E isto não é matéria simples. A matemática simplicidade do trabalho de Broglie na resposta a esta questão é a mais admirável. Ao tempo em que foi feito, a técnica matemática de outras teorias físicas era muito subtil e complicada, comparativamente falando. As matemáticas de uso no problema das ondas de matéria são extremamente simples, mas as ideias fundamentais são profundas e de grande alcance.

Vimos no caso das ondas de luz e do fotão que cada suposição formulada na linguagem ondulatória pode ser transladada para a linguagem dos fotões ou corpúsculos de luz. O mesmo se dá com as ondas electrónicas. Já sabemos a linguagem corpuscular para os electrões em movimento uniforme. Mas cada suposição expressa em linguagem corpuscular pode ser traduzida para a linguagem ondulatória, como no caso dos fotões. Duas pistas sugerem as regras da tradução. Uma delas está na analogia entre as ondas de luz e as ondas electrónicas, ou entre fotões e electrões. A teoria da relatividade restrita fornece a outra pista. As leis da Natureza devem ser invariantes com respeito à transformação de Lorentz, não com respeito à transformação clássica. Estas duas pistas juntas determinam o comprimento de onda correspondente ao electrão em movimento. Deriva da teoria de que um electrão, movendo-se com a velocidade, digamos, de quinze mil quilómetros por segundo, tem um comprimento de onda que pode ser facil-

mente calculado e que fica na mesma região dos comprimentos de onda dos raios X. Assim, concluimos que se o carácter de onda da matéria pode ser averiguado, esta averiguação tem que experimentalmente seguir caminho análogo à dos raios X.

Imaginemos um raio de electrão que se move uniformemente com grande velocidade, ou, para usar a terminologia ondulatória, uma onda electrónica homogénea, e suponhamos que esse raio de electrão cai sobre uma lâmina de cristal difractor. As distâncias entre os obstáculos no cristal são tão pequenas que podem produzir a difracção dos raios X. Podemos esperar um efeito semelhante com a onda electrónica, cujo comprimento é da mesma ordem de grandeza. A chapa fotográfica poderá registar a difracção da onda electrónica que atravessa o cristal. E na realidade a experiência confirma a teoria: confirma a difracção da onda electrónica! A similaridade entre a difracção de uma onda e a de um raio X torna-se particularmente acentuada, como vemos na Estampa III. Sabemos que tais fotografias nos habilitam a determinar o comprimento das ondas dos raios X. E o mesmo se dá para as ondas electrónicas. O desenho da difracção dá o comprimento de uma onda de matéria e mostra o perfeito acordo quantitativo entre a teoria e a experiência. A cadeia da argumentação está perfeitamente confirmada.

Mas com este resultado as nossas dificuldades anteriores ampliam-se, como se vê com um exemplo. Um electrão lançado através de abertura muito pequena encurvar-se-á do mesmo modo que a onda de luz. A chapa fotográfica revelará anéis luminosos e sombreados. Haverá esperança de explicar este fenómeno pela acção recíproca entre o electrão e a fímbria da abertura, embora não seja esperança muito fundada. Mas — no caso de duas aberturas, ou dois furos? Aparecem listas em vez de anéis. Como é possível que o simples facto da existência de um segundo furo mude completamente o efeito? O electrão é indivisível e pode passar unicamente por um dos furos. E pas-

sando por esse furo, como pode saber que outro furo foi aberto na vizinhança?

Anteriormente indagámos: que é a luz? Chuva de corpúsculos ou onda? Temos agora de indagar: que é a matéria, que é o electrão? Uma partícula ou uma onda? O electrão comporta-se como partícula quando se move num campo eléctrico ou magnético. Mas já no cristal difractante se comporta como onda. As mesmas dificuldades que nos surgiram com os «quanta» de luz ressurgem com os «quanta» da matéria. Uma das questões fundamentais formuladas pelo moderno avanço da ciência é como reconciliar a contradição entre matéria e onda. Resolvida que seja, advirão grandes consequências para o progresso da ciência. A física tentou resolver o problema — mas só o futuro dirá se a solução apresentada é definitiva ou temporária.

## PROBABILIDADES ONDULATÓRIAS

Se, de acordo com a mecânica antiga, sabemos a posição e a velocidade de um dado ponto material e sabemos também que forças externas estão agindo, podemos predizer, do ponto de vista mecânico, a futura órbita desse ponto. A frase: «O ponto material tem tal e tal posição e velocidade em tal e tal instante» possui na velha mecânica uma significação definida. Se esta afirmação perdesse o sentido, o nosso argumento (pág. 35) quanto à previsão da futura órbita falharia.

No começo do século XIX os sábios queriam reduzir toda a física a simples forças actuantes sobre partículas materiais com posições e velocidades definidas num dado instante. Recordemos como descrevíamos o movimento na discussão da mecânica, no começo da nossa jornada através dos problemas físicos. Assinalávamos pontos ao longo de uma órbita definida, mostrando a exacta posição do corpo num certo momento e traçávamos vectores tangentes mostrando a direcção e a intensi-

dade das velocidades. Era simples e convincente. Mas não é processo que possa ser repetido para os nossos «quanta» elementares de matéria (electrões) ou de energia (fotões). Não podemos representar a viagem de um fotão ou de um electrão pelo modo que imaginámos o movimento na velha mecânica. O caso dos dois furos vizinhos o mostra. O electrão e o fotão parecem passar pelos dois furos. Torna-se impossível explicar o efeito pela representação, ao modo clássico, da órbita de um electrão ou de um fotão.

Temos, sem dúvida, de assinalar a presença de acções elementares, como seja a passagem dos electrões ou fotões pelos furos. A existência dos «quanta» elementares de matéria e energia não pode ser posta em dúvida. Mas as leis elementares não podem ser formuladas pela especificação de posições e velocidades num dado instante, da maneira simples como se fazia na velha mecânica.

Experimentemos, em vista disso, algo diferente. Repitamos continuamente os mesmos processos elementares. Um após outro, os electrões são enviados na direcção dos furos. A palavra «electrão» é usada aqui apenas para precisar o conceito; o nosso raciocínio vale também para os fotões.

A mesma experiência é repetida sucessivas vezes, sempre da mesma maneira. Todos os electrões têm a mesma velocidade e se movem na direcção dos furos. Inútil lembrar que isto é uma experiência idealizada só possível por um esforço de imaginação. Na realidade não podemos num dado instante lançar um electrão ou um fotão como lançamos balas de carabina.

Os resultados de repetidas experiências devem ser sempre anéis de luz e sombra num furo e listas de luz e sombra em dois furos. Mas há uma diferença essencial. No caso de um electrão único o resultado experimental foi incompreensível. Torna-se mais apreensível quando a experiência se repete muitas vezes. Podemos dizer: as listas luminosas aparecem onde muitos electrões caem. As listas tornam-se mais escuras onde poucos electrões estão caindo. Um ponto completamente

escuro significa ausência de electrões. Não somos obrigados a admitir que todos os electrões passem por um dos furos. Se fosse assim, não haveria a menor diferença, se o outro furo existisse ou não. Mas já sabemos que isso faz diferença. Desde que uma partícula é indivisível, não podemos imaginar que ela passa através dos dois furos. O facto de a experiência ter sido repetida muitas vezes aponta-nos outro caminho. Alguns dos electrões podem passar pelo primeiro furo; e outros, pelo segundo. Não sabemos porque uns electrões escolhem este ou aquele furo; mas o resultado líquido de repetidas experiências deve ser que ambos os furos participam na transmissão dos electrões. Se estabelecemos apenas o que acontece à multidão de electrões quando a experiência é repetida, sem nos preocuparmos com o comportamento da partícula individual, as diferenças entre os anéis e as listas tornam-se compreensíveis. Pela discussão de uma sequência de experiências nova ideia nasceu, qual seja a de uma multidão com indivíduos a comportarem-se de maneira imprevisível. Não podemos prever o curso do electrão isolado; mas podemos prever que, no resultado líquido, listas de luz e sombra aparecem.

Vamos pôr de lado o «quantum», por um momento.

Vimos na física antiga que, se em dado instante soubéssemos da posição e velocidade de um ponto material e conhecêssemos as forças nele actuantes, poderíamos predizer a sua futura órbita. Vimos também como o ponto de vista mecânico foi aplicado à teoria cinética da matéria. Mas nesta teoria uma ideia nova surgiu do raciocínio. Para a boa compreensão de posteriores argumentos, será de vantagem a perfeita apreensão desta ideia.

Temos um vaso contendo um gás. Para traçar o movimento de cada partícula teríamos de começar por descobrir os estados iniciais, isto é, a posição e a velocidade inicial de todas as partículas. Ainda que isso fosse possível, levaria mais de uma existência humana para fixar no papel o resultado, em vista do enorme número de partículas em causa. E se para

calcular a posição final das partículas quiséssemos empregar os métodos clássicos, arcaríamos com dificuldades insuperáveis. Em princípio é possível usar o método aplicado para o movimento dos planetas; mas na prática é impossível, e temos de recorrer ao *método estatístico*. Este método dispensa qualquer conhecimento exacto dos estados iniciais. Sabemos menos a propósito do sistema, num dado momento, e ficamos assim menos habilitados a dizer qualquer coisa do seu passado ou do seu futuro. Tornamo-nos indiferentes ao destino das partículas individuais do gás. O nosso problema é de outra natureza. Não indagamos, por exemplo, «Qual a velocidade de cada partícula neste momento?» Mas podemos perguntar: «Quantas partículas têm uma velocidade de 1000 a 1100 pés por segundo?» Abandono completo do indivíduo. O que procuramos determinar são os valores médios típicos do agregado.

Pela aplicação do método estatístico não podemos prever o comportamento de um indivíduo na multidão. Só podemos prever a *probabilidade* de que o indivíduo se comporte de certa maneira. Se as nossas leis estatísticas nos dizem que um terço das partículas tem a velocidade entre 300 e 330 metros por segundo, isso quer dizer que, repetindo as nossas observações com muitas partículas, realmente obteremos essa média, ou, por outras palavras, que a probabilidade de encontrar uma partícula dentro desse limite é de um terço.

Semelhantemente, conhecer o índice de nascimento de uma grande cidade não significa saber que cada família é abençoada com descendência. Significa um conhecimento de resultados estatísticos nos quais os indivíduos não representam qualquer papel.

Observando as chapas de muitos automóveis podemos verificar que um terço do seu número é divisível por três. Mas não podemos prever que o carro que lá vem revelará essa propriedade. As leis estatísticas só podem ser aplicadas a grandes agregados, não individualmente aos seus membros.

Cumpre voltarmos agora ao nosso «quantum».

As leis do «quantum» têm carácter estatístico. Quer dizer que não dizem respeito a um sistema individual, mas a um agregado de sistemas semelhantes; não podem ser verificados pela medição de um indivíduo, mas por séries de repetidas medições.

A desintegração radioactiva — a espontânea transmutação de um elemento em outro — é um dos muitos factos para os quais a física do «quantum» procura formular leis. Sabemos, por exemplo, que em mil e seiscentos anos um grama de rádio se desintegra por metade; só permanece meio grama. Podemos prever, aproximativamente, como muitos átomos se desintegrarão durante a próxima meia hora; mas não podemos dizer, nem sequer teoricamente, por que motivo esses átomos estão condenados. Segundo os nossos actuais conhecimentos, não temos poder para designar os átomos individuais condenados à desintegração. O destino de um átomo não depende da sua idade. Não existe o menor traço de lei a governar-lhe o comportamento individual. Só leis estatísticas podem ser formuladas, leis que regem grandes agregados de átomos.

Outro exemplo. O gás luminoso de um elemento colocado diante do espectroscópio mostra linhas de ondas definidas quanto ao comprimento. A aparição de um conjunto descontínuo de ondas de definido comprimento é característica do fenómeno atómico no qual a existência dos «quanta» elementares se revela. Mas isto é outro aspecto do problema. Algumas linhas do espectro são muito distintas, outras são mais apagadas. A linha bem distinta significa que um número comparativamente grande de fotões pertencente a este particular comprimento de onda foi emitido; a linha apagada significa que um número comparativamente pequeno de fotões pertencente a esse comprimento de onda foi emitido. A teoria novamente nos dá apenas resultados estatísticos. Cada linha corresponde a uma transição do mais alto para o mais baixo nível de energia. A teoria só nos diz sobre a probabilidade de cada uma destas possíveis transições, mas nada da real transição do

átomo individual. A teoria firma-se esplendidamente, porque todos os fenómenos envolvem grandes agregados de átomos e não um indivíduo apenas.

Parece que a nova física do «quantum» se assemelha alguma coisa à teoria cinética da matéria, uma vez que ambas são de natureza estatística e só se referem a grandes agregados. Mas não é assim! É muito importante nesta analogia a compreensão das diferenças — mais que a das similaridades. A similaridade entre a teoria cinética e o «quantum» jaz sobretudo nesse carácter estatístico. Mas as diferenças?

Se desejamos conhecer quantos homens e mulheres acima da idade de vinte anos vivem numa cidade, temos de preencher num boletim as colunas «Masculino», «Feminino», «Idade». Contando, separando e somando, obtemos um resultado de natureza estatística. Os nomes e endereços dos indivíduos recenceados nas fórmulas não entram em linha de conta. O nosso conhecimento estatístico é adquirido pelo conhecimento dos casos individuais. Do mesmo modo, na teoria cinética da matéria temos leis estatísticas a governarem o agregado, leis que se baseiam em leis individuais.

Mas na física do «quantum» a situação é de todo diversa. As leis estatísticas aparecem imediatamente e as leis individuais ficam ignoradas. No exemplo de um fotão, de um electrão e dois furos de alfinete, vimos ser impossível descrever o movimento das partículas elementares no espaço e no tempo, como fizemos na velha física. A teoria do «quantum» abandona as leis individuais das partículas e estabelece *directamente* as leis estatísticas que regem os agregados. Com base no «quantum» é impossível descrever as posições e velocidade de uma partícula elementar, ou predizer a sua futura órbita, como na velha física. Os «quanta» físicos só dizem respeito a agregados, e as suas leis são para multidões, não para indivíduos isolados.

Não foi o desejo de novidade, mas sim a dura necessidade, que nos levou a reformar as ideias antigas. As dificuldades de aplicar as leis clássicas acentuámo-las num caso apenas, o dos

fenómenos de difracção. Outros igualmente ponderosos podiam ser citados. Mudanças desta ordem são continuamente impostas aos cientistas pelo esforço de compreender a realidade. O futuro, entretanto, dirá se escolhemos a única via possível ou se há melhor caminho para a solução das nossas dificuldades.

Tivemos de abandonar a descrição de casos individuais no estudo do que acontece no espaço e no tempo; tivemos de introduzir leis de carácter estatístico. São estas as principais feições da moderna teoria do «quantum».

Quando anteriormente introduzimos novas realidades físicas, tais como o campo electromagnético e o gravítico, experimentámos frisar em termos gerais as características das equações que permitiram a formulação matemática dessas ideias. Vamos agora fazer o mesmo com o «quantum», referindo-nos de leve aos trabalhos de Bohr, de De Broglie, de Schrodinger, de Heisenberg, de Dirac e de Born.

Consideremos o caso de um electrão. O electrão pode estar sob a influência de um campo electromagnético arbitrário, ou livre de qualquer influência externa. Pode, por exemplo, mover-se no campo de um núcleo atómico ou difractar-se no cristal. A teoria do «quantum» ensina-nos como formular as equações matemáticas para qualquer destes problemas.

Já admitimos a similaridade entre a corda oscilante, ou a de um violino, e um átomo radiante. Há também alguma similaridade entre as equações matemáticas que regem o problema acústico e as que regem o problema do «quantum». Mas a interpretação física das quantidades determinadas nestes dois casos é completamente diversa. As quantidades físicas que descrevem a corda oscilante ou o átomo radiante têm significação diferente, a despeito de semelhanças de forma nas equações. No caso da corda, indagamos do afastamento de um ponto arbitrário num momento arbitrário — desvio da posição normal. Conhecendo a forma da corda oscilante num dado momento, sabemos tudo quanto desejamos. O desvio da posição normal pode ser calculado para qualquer outro momento por

meio das equações matemáticas da oscilação da corda. O facto de que a um determinado afastamento da posição normal correspondem desvios determinados de cada ponto da corda, expressa-se mais rigorosamente deste modo: para cada instante o desvio da posição normal é uma *função* das coordenadas dos pontos da corda. Todos os pontos da corda formam um contínuo unidimensional, e o desvio é uma definida função deste contínuo, calculável pelas equações da corda oscilante.

Analogamente, no caso de um electrão, uma certa função é determinada para cada ponto no espaço e para cada momento. Podemos chamar a função *probabilidade-ondulatória*. Na nossa analogia a probabilidade-ondulatória corresponde ao desvio da posição normal no problema acústico. A probabilidade-ondulatória é, num dado momento, função de um contínuo tridimensional; como no caso da corda o desvio era, num dado momento, função do contínuo unidimensional. A probabilidade-ondulatória forma o esquema dos nossos conhecimentos do sistema do «quantum» e habilita-nos a responder a todas as questões estatísticas do sistema. Não nos diz a posição e a velocidade do electrão num dado momento, porque tal questão nada significa na teoria do «quantum». Mas diz-nos da probabilidade de encontrar o electrão num certo ponto, ou onde temos as maiores probabilidades de encontrá-lo. O resultado não se refere a uma, mas a muitas medições repetidas. Deste modo as equações do «quantum» determinam a probabilidade-ondulatória justamente como as equações de Maxwell determinam o campo electromagnético, e as equações gravitacionais determinam o campo gravítico. As leis do «quantum» são também leis de estrutura. Mas a significação dos conceitos físicos determinados pelas equações do «quantum» são mais abstractas que as electromagnéticas e gravitacionais; apenas nos fornecem meios matemáticos de responder a questões de natureza estatística.

Até aqui consideramos o electrão em algum campo externo. Se não se tratasse do electrão, que é a menor carga possível,

mas de uma respeitável carga contendo biliões de electrões, poderíamos pôr de lado a teoria do «quantum» e tratar o problema de acordo com a velha física. Falando de corrente num fio, de condutores carregados, de ondas electromagnéticas, podemos aplicar a nossa velha e simples física, como a temos nas equações de Maxwell. Mas torna-se impossível fazer isto quando se trata do efeito fotoeléctrico, da intensidade das linhas do espectro, da difracção de ondas electrónicas e de muitos outros fenómenos, nos quais o carácter «quantum» da matéria e energia se revela. Se na velha física falávamos de posições e velocidades de uma partícula, aqui temos de considerar probabilidades-ondulatórias num contínuo tridimensional como correspondentes a este problema de uma partícula.

O «quantum» físico dá-nos as suas próprias regras para o tratamento de um problema, se anteriormente já sabemos como tratar um problema análogo do ponto de vista da física antiga.

Para uma partícula elementar, electrão ou fotão, temos as probabilidades-ondulatórias num contínuo tridimensional, caracterizando o comportamento estatístico do sistema. Mas que acontece no caso de duas partículas interactuantes, como por exemplo, dois electrões, um electrão e um fotão, ou electrões e núcleos? Não podemos tratá-los separadamente e descrever cada qual por meio de uma probabilidade-ondulatória em três dimensões, justamente por causa da mútua interacção. Na realidade não é muito difícil imaginar como descrever na teoria do «quantum» um sistema composto de duas partículas interactuantes. Basta descer um andar, ou regressar por um momento à velha física. A posição de dois pontos materiais no espaço é caracterizado por seis números, três para cada ponto. Todas as posições possíveis de dois pontos materiais formam um contínuo de seis dimensões, e não um tridimensional como no caso de um ponto. Semelhantemente, para três, quatro e mais partículas as probabilidades-ondulatórias são funções num contínuo de nove, doze e mais dimensões.

Isto mostra claramente que as probabilidades-ondulatórias

são mais abstractas do que o campo electromagnético e o gravítico no espaço tridimensional. O contínuo de muitas dimensões forma o fundo das probabilidades-ondulatórias e só para uma partícula o número de dimensões é o mesmo do espaço físico. A única significação física da probabilidade-ondulatória é que ela nos permite responder de modo estatístico a questões tanto no caso de muitas partículas como no de uma apenas. Assim, por exemplo, para um electrão podemos indagar da probabilidade de encontrá-lo num certo ponto. Tratando-se de duas partículas, a nossa questão seria: qual a probabilidade de encontrar as duas partículas em dois pontos definidos, num dado instante?

O nosso primeiro passo de afastamento da velha física foi abandonar a descrição dos casos individuais como eventos objectivos no espaço e no tempo. Fomos forçados a aplicar o método estatístico por meio das probabilidades-ondulatórias. Uma vez escolhido este caminho, tivemos de seguir além, rumo à abstracção. As probabilidades-ondulatórias em muitas dimensões foram então introduzidas.

De um modo resumido poderemos chamar física clássica tudo o que não diz respeito à física do «quantum». A física clássica e a física do «quantum» diferem radicalmente. A velha física tem como alvo a descrição de objectos existentes no espaço e a formulação das leis que lhes governam as mudanças. Mas os fenómenos que revelam a partícula e a natureza ondulatória da matéria e da radiação, o carácter aparentemente estatístico de eventos elementares, tais como a desintegração radioactiva, a difracção, a emissão de linhas espectrais e muitos outros, forçam-nos a abandonar este ponto de vista. O «quantum» físico não visa a descrição de objectos individuais no espaço e as suas mudanças no tempo. No «quantum» físico não há lugar para afirmações como esta: «Este objecto é isto e isto, e tem tais propriedades.» Temos, pelo contrário, afirmações como esta: «Há tais e tais probabilidades de que o objecto individual seja assim e assim, e tenha esta propriedade.» No

«quantum» físico não há lugar para leis que governam as mudanças do objecto individual no tempo. Há leis governando mudanças no tempo das probabilidades. A mudança fundamental determinada na física pela teoria do «quantum» tornou possível uma adequada explanação do carácter aparentemente descontínuo e estatístico dos fenómenos em que a radiação e os «quanta» elementares da matéria revelam a sua existência.

Todavia, novos e ainda mais duros problemas se erguem. Mencionaremos alguns. A ciência não será nunca um livro fechado. Cada avanço abre novas questões. Cada desenvolvimento revela novas e mais profundas dificuldades.

Já sabemos que, no simples caso de uma ou muitas partículas, podemos subir do clássico para a descrição do «quantum»; subir da sua descrição objectiva dos eventos no espaço e no tempo para as probabilidades-ondulatórias. Mas como descrever a acção recíproca entre os «quanta» elementares da matéria e o campo? Se uma probabilidade-ondulatória de trinta dimensões se torna necessária para a descrição do «quantum» de dez partículas, então a probabilidade-ondulatória de um número infinito de dimensões será necessária para a descrição do «quantum» de um campo. A transição do conceito clássico de campo para o correspondente problema da probabilidade-ondulatória no «quantum» físico, é um passo muito penoso. Subir um andar não é aqui fácil, e todas as tentativas até agora feitas para resolver o problema não satisfazem. Há ainda outro problema fundamental. Em todos os nossos argumentos a respeito da transição da física clássica para o «quantum» físico usámos a velha descrição, anterior à relatividade, na qual o espaço e o tempo são tratados diferentemente. Se, entretanto, experimentamos começar pela descrição clássica como foi proposto pela teoria da relatividade, então a nossa subida ao problema do «quantum» aparece muito mais complicada. Há ainda outra dificuldade na formação de uma sólida física para as partículas pesadas, ou os núcleos. A despeito de muitos dados

experimentais e de muitas tentativas para lançar luz sobre o problema nuclear, estamos ainda no escuro.

Não há dúvida que o «quantum» físico explicou grande variedade de actos, conseguindo esplêndido acordo entre a teoria e a observação. O novo «quantum» físico afasta-nos ainda mais dos velhos conceitos mecânicos, e um retorno parece cada vez mais improvável. Mas também não há dúvida que o «quantum» físico ainda precisa basear-se nos dois conceitos de matéria e campo. É neste sentido uma teoria dualística, que não atende ao nosso velho problema de tudo reduzir ao conceito de campo.

Neste rumo do «quantum» físico advirão posteriores desenvolvimentos ou surgirão novas ideias revolucionárias? Defrontaremos mais voltas no caminho, como tantas vezes aconteceu no passado?

Durante os últimos anos as dificuldades do «quantum» físico concentraram-se em redor de poucos pontos. A física espera impacientemente estas soluções, sendo entretanto impossível prever quando e como virão.

## FÍSICA E REALIDADE

Que conclusões podemos tirar do desenvolvimento da física como foi delineado neste livro?

A ciência não é apenas uma colecção de leis, um catálogo de factos não relacionados. É uma criação do espírito humano, com ideias e conceitos livremente inventados. As teorias físicas experimentam traçar um quadro da realidade e estabelecer liames com o nosso mundo de impressões. Assim, a única justificativa para as nossas estruturas mentais está em que as nossas teorias formem esses elos.

Vimos novas realidades criadas pelos avanços da física. Mas esta cadeia de criação pode ser traçada desde muito antes do começo da física. Um dos conceitos mais primitivos é o de

objecto. O conceito de uma árvore, um cavalo ou qualquer corpo material, foram criações baseadas na experiência, embora as impressões que esses objectos nos sugiram sejam primitivas em comparação com o mundo dos fenómenos físicos. Um gato atormentando um rato também cria, pelo pensamento, a sua própria realidade primitiva. O facto de o gato assim reagir diante de qualquer rato, mostra que ele forma conceitos e teorias que o guiam através do seu mundo de impressões sensoriais.

«Três árvores» é algo diferente de «duas árvores». Também «duas árvores» é diferente de «duas pedras». Os conceitos de número, 2, 3, 4..., libertados dos objectos de que eles surgem, são criações do cérebro pensante, que descrevem a realidade do nosso mundo.

O sentimento psicológico subjectivo de tempo habilita-nos a ordenar as nossas impressões, a estabelecer que um acontecimento precede outro. Mas ligar com um número cada instante de tempo por meio do relógio, para considerar o tempo um contínuo unidimensional, já é invenção. Assim também os conceitos da geometria euclidiana e os da não-euclidiana, e o nosso espaço concebido como um contínuo tridimensional.

A física realmente começou com a invenção da massa, da força e do sistema inerte. Todos estes conceitos são de pura invenção. Levou-nos à formulação do ponto de vista mecanicista. Para o físico do século XIX a realidade do mundo externo consistia em partículas com forças interactuantes e dependentes de distância. Esse físico procurou reter pelo maior tempo possível a sua fé na possibilidade de explicar todos os factos da Natureza por meio desses conceitos fundamentais. As dificuldades oriundas da deflexão da agulha magnética e as decorrentes da estrutura do éter levaram-nos a criar uma teoria mais subtil da realidade. Aparece a brilhante invenção do campo electromagnético. Uma corajosa imaginação científica tornou-se necessária para compreender que não o comportamento dos corpos, mas o comportamento de alguns entre eles, isto é, o

campo, pode ser essencial para a ordenação e a compreensão dos factos.

Ulteriores desenvolvimentos destruíram os velhos conceitos e criaram novos. O tempo absoluto e o sistema inercial coordenado foram substituídos pela teoria da relatividade. O fundo para todos os eventos deixou de ser o tempo unidimensional e o contínuo tridimensional, e tornou-se o contínuo de espaço-tempo quadridimensional — outra invenção livre com novas propriedades de transformação. Cada sistema coordenado é igualmente adequado à descrição dos eventos da Natureza.

A teoria do «quantum» físico criou novas feições para a nossa realidade. A descontinuidade substituiu a continuidade. Em vez de leis governando indivíduos, passámos a ter leis de probabilidade.

A realidade criada pela física moderna está realmente muito afastada da realidade dos tempos antigos. Mas o objectivo de cada teoria física permanece o mesmo.

Com a ajuda das teorias físicas experimentamos encontrar caminho através do nevoeiro dos factos observados, de modo a ordenar e compreender o mundo das nossas impressões sensoriais. Queremos que os factos observados decorram logicamente do nosso conceito da realidade. Sem a fé na possibilidade de apreender a realidade por meio das nossas construções teóricas, sem a fé na harmonia do nosso mundo, impossível a ciência. Esta fé é, e permanecerá sempre, o motivo fundamental de todas as criações científicas. Através de todos os nossos esforços e em cada luta entre as ideias novas e as velhas, percebemos o eterno anseio pela compreensão, a inabalável fé na harmonia do mundo, continuamente fortificada pelos obstáculos que cada vez mais se erguem ante a nossa compreensão.

RESUMINDO:

*De novo a rica variedade de factos nos domínios dos fenómenos atómicos nos força a inventar novos conceitos. A matéria tem estrutura granular; é composta de partículas elementares — os «quanta» elementares da matéria. Assim, a carga eléctrica também tem estrutura granular e — o que é muito importante do ponto de vista da teoria do «quantum» — a energia também tem essa mesma estrutura. Fotões são os «quanta» de energia de que a luz se compõe.*

*É a luz uma onda ou uma chuva de fotões? É o raio de electrões uma chuva de partículas elementares ou uma onda? Estas questões fundamentais entraram forçadamente na física — forçadas pela experiência. Procurando atendê-las, tivemos de abandonar a descrição dos eventos atómicos como factos de espaço e tempo, afastando-nos assim, ainda mais, do velho ponto de vista mecanicista. O «quantum» físico formula leis regentes de multidões, não de indivíduos. Em vez de propriedades, são descritas probabilidades; não são formuladas leis que descrevem o futuro dos sistemas, mas sim leis que regem as mudanças das probabilidades no tempo, relativas a grandes agregados de indivíduos.*